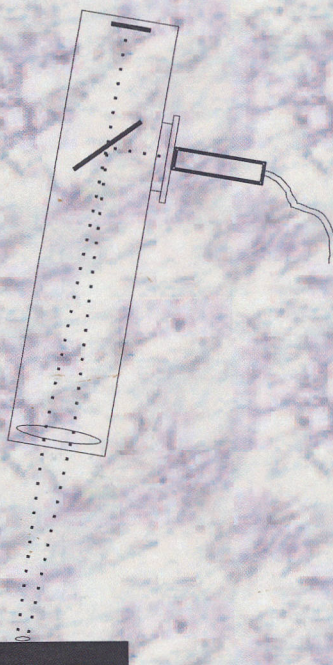


***Desarrollo e Instrumentación de un Sistema  
Exportable de Monitorización y Control en  
Tiempo Real de Procesos de Tratamiento  
Superficial de Aceros con Láser***



***José Carlos Álvarez Feal***

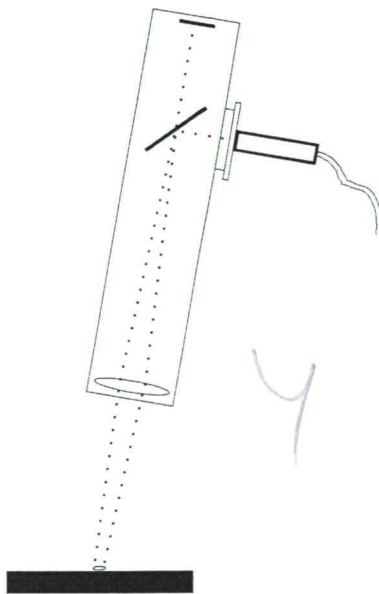
Memoria para optar al grado de Doctor  
en Ingeniería Industrial

Departamento de Enxenería Industrial II  
Universidade da Coruña



*Desarrollo e Instrumentación de un Sistema  
Exportable de Monitorización y Control en  
Tiempo Real de Procesos de Tratamiento  
Superficial de Aceros con Láser*

*José Carlos Álvarez Feal*



*Dirección: José Luis Ocaña Moreno*



## Agradecimientos

Este trabajo no se ha podido realizar sin la colaboración de todas las personas que de algún modo me han ayudado en estos años. En primer lugar a mis padres, Carlos Alvarez Sanmartín y Carmela Feal Rey, que me enseñaron a valorar la constancia en el estudio y el trabajo, así como a intentar ser mejor persona.

A todos los componentes del grupo de investigación sobre Aplicaciones Industriales del Láser (LAIL) de la Universidad de La Coruña: Alberto Ramil, Armando Yañez, Ginés Nicolas, Ana Jesús López, Emilio Saavedra, Tati Sanesteban, Coté Tobar, José Manuel Amado, por sus consejos y por compartir muchas horas de trabajo y de compañía. A Félix Ledo y Alberto Cuesta por su ayuda a “cacharrear” en el laboratorio.

Mención especial merece Jose Luis Ocaña que por su perseverancia, logró la adquisición del primer equipo láser para el laboratorio que nos permitió empezar a trabajar.

A mis hijos, Carmen y Javier, por el tiempo que esta tesis les ha impedido de disfrutar más de su padre.

Por último a mi esposa Carmen por su infinita paciencia, optimismo permanente y apoyo continuo que me ayudaron a superar todas las dificultades.



# Índice General

Introducción . . . . .	1
Organización de la memoria de tesis . . . . .	2
<b>1 Introducción al procesado de materiales con láser</b> . . . . .	<b>4</b>
1.1 Láseres e industria . . . . .	5
1.1.1 El láser como herramienta de producción . . . . .	6
1.1.2 Historia del procesado de materiales con láseres . . . . .	7
1.2 Sistemas láser . . . . .	8
1.2.1 Principios del funcionamiento del láser . . . . .	8
1.2.2 Tipos de láseres . . . . .	11
1.2.3 Propiedades del haz . . . . .	14
1.2.4 Sistemas ópticos de conformado y distribución de intensidad del haz . . . . .	21
1.3 Interacción Láser-Materia . . . . .	22
1.3.1 Introducción . . . . .	23
1.3.2 Propagación de ondas electromagnéticas en la materia . . . . .	24
1.3.3 Mecanismos de la interacción láser-materia . . . . .	28
1.3.4 Propiedades ópticas de los materiales: metales . . . . .	29
1.3.5 Factores que influyen en la reflectancia y absorptancia de la superficie del material . . . . .	32
1.3.6 Métodos para modificar la absorptancia superficial . . . . .	36
1.4 Procesos de tratamiento superficial . . . . .	39
1.4.1 Introducción . . . . .	39
1.4.2 Clasificación de los procesos de tratamiento térmico . . . . .	40
1.4.3 Tecnologías de endurecimiento por temple superficial . . . . .	41
<b>2 Procesos de temple superficial de aceros con láser</b> . . . . .	<b>43</b>
2.1 Introducción . . . . .	43
2.2 Metalurgia del acero . . . . .	45
2.2.1 Metales y aleaciones férricas . . . . .	45
2.2.2 Otros metales de interés . . . . .	50
2.3 Temple del acero . . . . .	51
2.3.1 Descripción del ciclo térmico . . . . .	52
2.3.2 Endurecimiento por temple superficial con láser y dureza de la superficie templada . . . . .	57
2.4 Parámetros generales de los tratamientos térmicos con láser . . . . .	59



2.4.1	Consideraciones generales sobre los parámetros del proceso . .	60
2.4.2	Parámetros que influyen en el proceso de temple . . . . .	61
<b>3</b>	<b>Modelización de tratamientos térmicos superficiales por láser</b>	<b>64</b>
3.1	Transmisión de calor en procesos de tratamiento térmico superficial . .	64
3.1.1	Soluciones analíticas . . . . .	69
3.1.2	Soluciones semi-cuantitativas . . . . .	75
3.1.3	Soluciones numéricas . . . . .	76
3.2	Determinación del punto mas caliente mediante números adimensionales	77
3.3	Estimación de durezas a partir de los ciclos térmicos . . . . .	83
3.3.1	Transformaciones de fase . . . . .	83
3.3.2	Endurecimiento . . . . .	86
3.4	Aplicación práctica al caso del endurecimiento del acero A420 . . . . .	88
3.4.1	Requisitos del tratamiento . . . . .	89
3.4.2	Modelo analítico . . . . .	91
3.4.3	Modelo numérico (FEM) . . . . .	92
3.4.4	Tratamiento de la pieza cilíndrica . . . . .	93
3.4.5	Conclusiones . . . . .	97
<b>4</b>	<b>Instrumentación desarrollada en laboratorio propio</b>	<b>100</b>
4.1	Sistemas en tiempo real para un sistema de control . . . . .	100
4.1.1	Introducción . . . . .	100
4.1.2	Necesidades temporales para distintos sistemas . . . . .	101
4.1.3	Definición de un sistema en tiempo real . . . . .	102
4.1.4	Alternativas para implantar un sistema en tiempo real . . . . .	102
4.1.5	Elección de la variable de control . . . . .	103
4.2	Termometría infrarroja . . . . .	105
4.2.1	Introducción . . . . .	105
4.2.2	Radiación térmica . . . . .	107
4.2.3	Comportamiento de una superficie radiante real . . . . .	110
4.3	Definición e instrumentación del sistema de control . . . . .	112
4.3.1	Tiempos reales de los diferentes procesos-sistemas que intervienen	112
4.3.2	Requisitos de entradas y salidas . . . . .	115
4.3.3	Incorporación a ordenador y programa de adquisición . . . . .	117
4.4	Implementación del sistema de control . . . . .	119
4.4.1	Instrumentación de las medidas con pirómetro . . . . .	119
4.4.2	Control externo de la potencia del láser . . . . .	136
4.5	Caracterización experimental de la temperatura y la distribución de potencia . . . . .	144
4.5.1	Métodos para la determinación de la absorción superficial . .	144
4.5.2	Determinación de la anchura del haz . . . . .	154
4.5.3	Comprobaciones previas al control en tiempo real . . . . .	157



<b>5</b>	<b>Diseño del sistema de control</b>	<b>161</b>
5.1	Elección del sistema de control	161
5.2	El algoritmo PID clásico	162
5.3	Implementando un algoritmo PID mejorado	163
5.4	Diagrama de bloques del PID con LabVIEW®	164
5.5	Ventana de usuario del regulador real	165
5.6	Filtrado de la señal	167
5.7	Ajuste del regulador por el método de Ziegler-Nichols	168
5.7.1	Análisis de la estabilidad crítica en lazo cerrado	169
5.7.2	Respuesta a un escalón del sistema en lazo abierto	169
5.7.3	Medidas experimentales y sintonización del sistema	171
5.8	Consideraciones finales	176
<b>6</b>	<b>Validación experimental y análisis de resultados</b>	<b>178</b>
6.1	Condiciones experimentales	178
6.1.1	Características del material empleado	178
6.2	Tratamiento de geometría plana	180
6.2.1	Dispositivo experimental para probeta plana	180
6.2.2	Metodología	181
6.2.3	Búsqueda de parámetros del proceso	182
6.2.4	Método de los elementos finitos	183
6.2.5	Resultados a potencia constante	183
6.2.6	Resultados a potencia controlada por regulador PID	184
6.3	Tratamiento de geometría cilíndrica	189
6.3.1	Dispositivo experimental para probeta cilíndrica	189
6.3.2	Metodología	189
6.3.3	Búsqueda de parámetros del proceso	190
6.3.4	Resultados obtenidos a potencia constante	191
6.3.5	Resultados obtenidos con potencia en rampas	192
6.3.6	Resultados a potencia controlada por regulador PID	194
6.3.7	Mapa de durezas en cilindro	195
<b>7</b>	<b>Conclusiones, aportaciones y líneas de futuro</b>	<b>199</b>
7.1	Conclusiones	199
7.2	Aportaciones	200
7.3	Líneas de futuro desarrollo	202
<b>8</b>	<b>Bibliografía</b>	<b>203</b>
<b>A</b>	<b>Equipos necesarios para el tratamiento térmico superficial de materiales metálicos con láser de potencia con control en tiempo real</b>	<b>212</b>
A.1	Resonador láser	212
A.2	Armario eléctrico del resonador	213
A.3	Sistema de provisión de gases	214
A.3.1	Gases del resonador	214
A.3.2	Gases de proceso	214



A.4	Mesa de coordenadas . . . . .	214
A.5	Armario eléctrico . . . . .	215
A.6	Refrigerador . . . . .	216
A.7	Compresor de aire y deshumidificador . . . . .	216
A.8	Aspirador y filtro de gases . . . . .	217
A.9	PC de diseño y posprocesado . . . . .	217
A.10	Pirómetro de radiación . . . . .	218
A.11	Tarjeta de adquisición . . . . .	219
A.12	PC de control . . . . .	220
A.13	Analizador de haz . . . . .	220
<b>B</b>	<b>Condiciones de los procesos y equipos para análisis de resultados</b>	<b>222</b>
B.1	Generalidades . . . . .	222
B.1.1	Condiciones de los procesos . . . . .	222
B.1.2	Parámetros de los procesos . . . . .	224
B.2	Preparación y estudio de las probetas de acero templadas . . . . .	224
B.2.1	Preparación metalográfica de las probetas templadas . . . . .	224
B.2.2	Análisis metalográfico de las probetas templadas . . . . .	226
B.3	Equipo de preparación metalográfica . . . . .	227
B.3.1	Cortadora . . . . .	227
B.3.2	Embutidora de probetas . . . . .	228
B.3.3	Pulidora . . . . .	228
B.4	Equipo de análisis metalográfico . . . . .	229
B.4.1	Fotomicroscopio metalográfico . . . . .	229
B.4.2	Microdurómetro . . . . .	229
B.4.3	Ejecución del análisis metalográfico . . . . .	230
<b>C</b>	<b>Programa PLC modificado</b>	<b>231</b>

# Índice de Figuras

1.1	<i>Mercado láser 2002 [LASER FOCUS 2003]. . . . .</i>	5
1.2	<i>Esquema de sistema de tres niveles. . . . .</i>	9
1.3	<i>Elementos de un resonador óptico. . . . .</i>	10
1.4	<i>Esquema resonador estable. . . . .</i>	19
1.5	<i>Distribución de energía de un TEM01*. . . . .</i>	20
1.6	<i>Tecnologías que intervienen en el proceso. . . . .</i>	22
1.7	<i>Representación de los flujos de energía en la interacción. . . . .</i>	23
1.8	<i>Absorción de la radiación en un medio material. . . . .</i>	26
1.9	<i>Absortancia frente a longitud de onda. . . . .</i>	33
1.10	<i>Variación de la absortancia con el ángulo de incidencia y la longitud de onda para el hierro puro a temperatura ambiente. . . . .</i>	34
2.1	<i>Proceso de tratamiento de endurecimiento por láser. . . . .</i>	44
2.2	<i>Diagrama de equilibrio hierro-carbono [AVNER 1988]. . . . .</i>	46
2.3	<i>Diagrama TTT para un acero AISI 1050 [MIGLIORE 1996]. . . . .</i>	48
2.4	<i>Diagrama CHT para acero X38CrMoV 5 1 [ASM 1991]. . . . .</i>	49
2.5	<i>Dureza obtenible en función del contenido de Carbono [KRAUSS 1995]. . . . .</i>	50
2.6	<i>Efecto de los aleantes en los diagramas TTT: (A) 0.91 % Mn ; (B) 1.32 % Mn [CARRASQUILLA 1992]. . . . .</i>	50
2.7	<i>Variación de la dureza del acero en función del contenido en martensita [MIGLIORE 1996]. . . . .</i>	55
3.1	<i>Temperatura máxima y su posición como función del número de Peclet. . . . .</i>	82
3.2	<i>Las coordenadas inicial y final se unen por pasos isoterms intercalados con otros de fracción volúmica constante. . . . .</i>	84
3.3	<i>Diagramas ITh para el acero F114. . . . .</i>	85
3.4	<i>Evolución de la temperatura frente al tiempo a 0.7 mm de profundidad. Se indican las temperaturas de inicio y fin de la formación de martensita. . . . .</i>	86
3.5	<i>Fracción volúmica de las diferentes fases frente al tiempo durante el calentamiento. . . . .</i>	87
3.6	<i>Diagrama TTT de enfriamiento isoterms para un acero F114. . . . .</i>	88
3.7	<i>Fracción volúmica de las diferentes fases frente al tiempo durante el enfriamiento. . . . .</i>	89
3.8	<i>Esquema de pasada en espiral con solape. . . . .</i>	90
3.9	<i>Disposición de los ejes de coordenadas. . . . .</i>	90

3.10	<i>Evolución de la temperatura para potencia constante (izquierda) y escalones decrecientes (derecha).</i>	93
3.11	<i>Evolución de la temperatura con potencia constante.</i>	94
3.12	<i>Evolución de la temperatura con potencia en escalones decrecientes.</i>	95
3.13	<i>Evolución de la temperatura de un punto. (a) en un solo ciclo ; (b) en todo el proceso.</i>	96
3.14	<i>Evolución del ancho y la profundidad de las isoterma Ac1 (980 °C) y Ac3 (1065 °C).</i>	96
3.15	<i>Ciclos térmicos para puntos de las mismas coordenadas (x,y) a diferentes profundidades. a) z = 1 mm; b) z = 2 mm; c) z = 3 mm d) z = 4 mm. d) z = 5 mm e) z = 6 mm.</i>	97
3.16	<i>Dureza medida para un punto situado en: (I) zona de solape B; (II) zona correspondiente al centro de la segunda vuelta.</i>	98
3.17	<i>Secuencia del proceso de tratamiento.</i>	98
4.1	<i>Diagrama de bloques de un sistema de control digital.</i>	101
4.2	<i>Ciclo térmico de puntos situados a diferente profundidad. La curva mas elevada corresponde a la superficie.</i>	104
4.3	<i>Distribución de temperaturas en la superficie.</i>	104
4.4	<i>Ley de Planck. Radiación espectral del cuerpo negro para diferentes temperaturas.</i>	108
4.5	<i>Ley de desplazamiento de Wien. La linea de puntos es el lugar de los puntos de máxima radiación.</i>	109
4.6	<i>Radiación espectral diferente para cuerpo negro, cuerpo gris y cuerpo real.</i>	111
4.7	<i>Diagrama del bucle de control en lazo cerrado.</i>	112
4.8	<i>Respuesta temporal láser-probeta.</i>	113
4.9	<i>Retardo en señal control debido al PLC.</i>	115
4.10	<i>Variación del punto de medida del pirómetro al variar la distancia entre la lente y la probeta.</i>	120
4.11	<i>Soprote del pirómetro ajustable en tres ejes independientes.</i>	121
4.12	<i>Disposición general esquemática del sistema de puntería.</i>	122
4.13	<i>Soprote de la fuente láser de alineación.</i>	123
4.14	<i>Sistema de ajuste y fijación del diodo.</i>	124
4.15	<i>Vista del dispositivo real.</i>	124
4.16	<i>Figura donde se ve la huella del disparo sobre el papel y los puntos proyectados del diodo sobre esa superficie.</i>	125
4.17	<i>Disco para comprobación del área de medida y alineación.</i>	127
4.18	<i>Distribución de temperaturas alrededor del punto de temperatura máxima situado en x=0.</i>	129
4.19	<i>Relación entre la temperatura media y el valor máximo con el diámetro del área de medida del pirómetro.</i>	130
4.20	<i>Influencia del desplazamiento del pirómetro respecto del punto mas caliente.</i>	131
4.21	<i>Ruido en la señal pirómetro para diferentes cables.</i>	132
4.22	<i>Diferencias de ruido en la señal del pirómetro según el tipo de salida utilizada.</i>	133
4.23	<i>Influencia del ajuste de emisividad en el ruido de la señal del pirómetro.</i>	135



4.24	<i>Disposición del experimento para método calorimétrico.</i>	146
4.25	<i>Lecturas comparativas pirómetro-termómetro a diferentes valores de emisividad.</i>	148
4.26	<i>Lectura del pirómetro.</i>	150
4.27	<i>Evolución de la temperatura para diferentes valores de absorción de la fase sólida.</i>	151
4.28	<i>Coefficiente de absorción frente al tiempo transcurrido hasta la fusión.</i>	151
4.29	<i>Comparación de la evolución de temperatura máxima por simulación para <math>\alpha_s=51\%</math> y la dada por el pirómetro.</i>	152
4.30	<i>Representación matemática del modo TEM 01*.</i>	155
4.31	<i>Huella sobre metacrilato.</i>	156
4.32	<i>Ventana del analizador mostrando sección y perfiles del haz.</i>	157
4.33	<i>Anchura haz. Comparativa impacto papel-medidas con analizador.</i>	158
4.34	<i>Perfil del haz para potencia 500 W y 2000 W para una distancia al punto focal de 43 mm.</i>	158
4.35	<i>Potencia láser en función de la entrada analógica.</i>	159
4.36	<i>Ruido en la señal de entrada al PLC.</i>	160
5.1	<i>Diagrama de bloques del programa PID con LabVIEW®.</i>	165
5.2	<i>Ventana usuario PID con LabVIEW®.</i>	166
5.3	<i>Ruido en la señal del pirómetro por los convertidores de frecuencia, antes (izq) y después (dcha.) del filtro paso-bajo.</i>	167
5.4	<i>Control PID de una planta.</i>	168
5.5	<i>Parámetros a determinar con la curva de respuesta del sistema a un escalón.</i>	170
5.6	<i>Respuesta real a un escalón de 1400 W y anchura de haz de 4 mm.</i>	172
5.7	<i>Registros para anchura de haz de 3 mm y valores de referencia de 700 °C (izq) y 1000 °C (dcha.).</i>	172
5.8	<i>Gráfico de frecuencias para los registros de temperatura de un sistema oscilante (izq) y otro estable (dcha.).</i>	173
5.9	<i>Respuesta del sistema para referencias de 950 °C (izquierda) y 1400 °C (derecha).</i>	174
5.10	<i>Gráfico de frecuencias para los registros de temperatura de un sistema estable para dos valores de referencia diferentes.</i>	175
5.11	<i>Sistema estable con <math>K_p = 2,33</math> ; <math>K_i = 7</math> ; <math>K_d = 0,37</math> y gráfica de frecuencias.</i>	176
6.1	<i>Densidad (izquierda) y capacidad calorífica (derecha) del acero AISI 1045 en función de la temperatura [SMITHELLS 1992].</i>	179
6.2	<i>Conductividad térmica del acero AISI 1045 en función de la temperatura [SMITHELLS 1992].</i>	179
6.3	<i>Temperaturas de transformación de fase en función de la velocidad de calentamiento [FARIAS 1991].</i>	180
6.4	<i>Esquema del montaje para pieza plana. El pirómetro (rojo) permite la lectura de la temperatura en tiempo real.</i>	180
6.5	<i>Disposición del mallado para FEM.</i>	183

6.6	<i>Evolución de la temperatura de una pieza plana por simulación (izquierda) y datos experimentales (derecha).</i>	184
6.7	<i>Mapa de temperaturas calculado en la sección estudiada (izq.) y distribución de la concentración de austenita al final del calentamiento (dcha.).</i>	185
6.8	<i>Mapa de concentración de martensita de una sección (izq). Las líneas señalan desde la marrón (90 %) a la azul (10 %) y mapa de durezas calculadas (dcha) para una mitad de la sección tratada. La dureza del material sin tratar está entre 200 HV y 250 HV.</i>	186
6.9	<i>Evolución de la potencia y la temperatura en tratamiento de pieza plana con regulador en tiempo real (izquierda) y gráfico de frecuencias para la evolución de la temperatura (derecha).</i>	187
6.10	<i>Mapa de durezas y dimensiones calculadas (izq) experimentales (dcha) de la zona endurecida en sección central del recorrido.</i>	188
6.11	<i>Esquema del montaje para el tratamiento de pieza de geometría cilíndrica.</i>	189
6.12	<i>Evolución de la temperatura de pieza cilíndrica con recorrido en hélice a potencia constante de 1800 W calculada (izq) y experimental (dcha).</i>	191
6.13	<i>Potencia en rampas decrecientes obtenidas por simulación.</i>	192
6.14	<i>Evolución de la temperatura para potencia en rampas obtenida por simulación (izq) y datos experimentales (dcha).</i>	193
6.15	<i>Evolución de la temperatura y la potencia con el regulador PID (izq) y gráfico de barras para la temperatura (dcha).</i>	194
6.16	<i>Curvas de isodureza a intervalos de 100 HV, para una sección. Izquierda: calculos por simulación. Derecha: medidas esperimentales.</i>	196
6.17	<i>Comparativa dureza superficial obtenida con rampas de potencia (trazo discontinuo) y con regulador PID (trazo continuo).</i>	197
6.18	<i>Máximos de dureza en profundidad en tratamiento con rampas (izq) y con regulador PID (dcha).</i>	198
6.19	<i>Mínimos de dureza en profundidad en tratamiento con rampas (izq) y con regulador PID (dcha).</i>	198
B.1	<i>Distribución real de la intensidad del haz láser TEM01*.</i>	223
B.2	<i>Probeta F114 redonda con recubrimiento absorbente.</i>	223
B.3	<i>Probeta tratada indicando líneas de corte.</i>	224
B.4	<i>Probeta cortada y embutida.</i>	225
B.5	<i>Foto de la zona tratada al microscopio (Zoom ×5).</i>	226
B.6	<i>Microestructura martensítica de la zona templada (Zoom ×50).</i>	227

# Índice de Tablas

1.1	<i>Propiedades ópticas de algunos materiales a temperatura ambiente. . .</i>	27
1.2	<i>Absortancia de diferentes materiales para la longitud de onda de un láser de CO<sub>2</sub> en incidencia normal. . . . .</i>	36
1.3	<i>Absortancia de diferentes recubrimientos para la longitud de onda de un láser de CO<sub>2</sub> en incidencia normal. . . . .</i>	37
3.1	<i>Convección libre en placas horizontales. . . . .</i>	67
3.2	<i>Convección forzada en placas. . . . .</i>	67
3.3	<i>Unidades y dimensiones de las magnitudes del problema. . . . .</i>	79
3.4	<i>Propiedades del material y parámetros del proceso. . . . .</i>	91
4.1	<i>Parámetros del tratamiento. . . . .</i>	129
4.2	<i>Propiedades de la probeta y el extremo de la sonda. . . . .</i>	147
4.3	<i>Parámetros del tratamiento. . . . .</i>	149
5.1	<i>Valores de los parámetros del PID con ajuste lazo cerrado. . . . .</i>	169
5.2	<i>Valores de los parámetros del PID con ajuste lazo abierto. . . . .</i>	171
5.3	<i>Valores de los parámetros del PID con ganancia distinta de uno. . . . .</i>	171
6.1	<i>Casos particulares para distintos valores de velocidad. . . . .</i>	182
6.2	<i>Dimensiones de la probeta y parámetros del tratamiento. . . . .</i>	183
6.3	<i>Dimensiones de la probeta cilíndrica y parámetros del tratamiento. . . . .</i>	190
6.4	<i>Rampas programadas en el láser: potencia/tiempo. . . . .</i>	192



# Objetivos y estructura de la tesis

## Introducción

La presente tesis se enmarca dentro de una de las líneas de investigación en las que el *Grupo de Aplicaciones Industriales del Láser (LAIL)* de la Universidad de la Coruña trabaja dentro del modelado teórico y caracterización experimental de procesos industriales con láseres de potencia.

En los últimos años se han desarrollado gran cantidad de aplicaciones industriales del láser en corte y soldadura. También se están aplicando con gran éxito en procesos de endurecimiento y tratamiento superficial de aceros, como recubrimientos, aleaciones, suavizado de superficies, ablaciones. El resultado de estos tratamientos depende de parámetros, que se ven influenciados por diferentes perturbaciones, unas internas y otras externas que determinan las propiedades resultantes y la calidad del resultado final.

El objetivo de la presente tesis es contribuir a mejorar el resultado final obtenido en procesos de temple superficial de metales con láser y garantizar su repetitibilidad mediante la introducción de un control del proceso en tiempo real. Se pretende que el sistema desarrollado sea totalmente exportable a la industria y para ello se necesita que tanto los equipos propuestos sean utilizables dentro de un ambiente industrial, que se puedan integrar con equipos industriales, que los programas desarrollados o utilizados no impliquen una etapa de formación de personal excesiva. Por último que el sistema propuesto permita un registro de los parámetros durante el proceso de forma que puedan servir para asegurar la trazabilidad de las piezas dentro de un programa general de control de calidad de la producción.

La combinación de modelos matemáticos y técnicas experimentales pueden constituir una herramienta eficaz con la que se pueden minimizar los costes de los experimentos así como predecir la naturaleza de las modificaciones que estos tratamientos causan en los materiales tratados.

## Organización de la memoria de tesis

Para lograr estos objetivos, en el capítulo 1, se realiza una revisión de las características de la interacción láser-materia y en el capítulo 2 del mecanismo del temple superficial de los aceros para tener presentes los factores que pueden influir en el resultado de estos procesos.

En el capítulo 3, se revisan primero los distintos modelos de simulación de procesos térmicos, luego se detalla el tipo de información que pueden proporcionar de cara a comprender qué está ocurriendo en el proceso de tratamiento térmico. Por ejemplo, la simulación numérica permite estimar cuantitativamente la distribución de temperaturas, la composición de las fases, la dureza y la profundidad alcanzada por el tratamiento.

Estas herramientas nos van a permitir relacionar la temperatura superficial con los cambios que ocurren en el material y por tanto la validarán como posible variable para utilizar en el control en tiempo real. Esto va a permitir la elección de la variable de control que se usará posteriormente, sabiendo sus ventajas y sus limitaciones reales.

Se acaba estudiando un proceso de tratamiento real, donde se puede apreciar como, la combinación de la simulación con modelos y técnicas experimentales nos permiten tener un conocimiento mas completo de lo que está ocurriendo en el tratamiento, a la vez que se detectan los problemas o limitaciones que tiene el uso de parámetros de proceso constantes y que justifican plantear el uso de un sistema de control en tiempo real.

En el capítulo 4, se continúa con el estudio de los equipos que intervienen en un proceso de tratamiento térmico con control en tiempo real, para caracterizar cada uno de los componentes del sistema (variable de control, tarjeta de adquisición, cables utilizados en las conexiones, ordenador personal, armario de control de láser, control del movimiento de la pieza y propiedades del material a tratar) de cara a su incorporación dentro de un sistema de control.

Se realizó un estudio pormenorizado de todos los parámetros o condiciones que pueden influir en las medidas realizadas con un pirómetro en un ambiente industrial, así como posibles problemas en función del tipo de cable utilizado para las señales y la forma de conexión para ayudar a evitarlos al implementar un sistema de control. Se caracteriza también, el sensor de temperatura pirométrico y se diseña un soporte y un sistema de puntería para facilitar la sujeción y alineación hacia el punto de mayor temperatura de la superficie de la pieza bajo tratamiento.

En el capítulo 5, se explican las características de un regulador clásico PID, sugiriendo algunas modificaciones para adaptarlo a las limitaciones físicas de la planta. Más tarde se caracteriza el comportamiento dinámico del sistema real estudiando su

respuesta a un escalón de potencia, proponiendo un método experimental para la sintonización final del regulador PID.

En el capítulo 6, se muestran las ventajas del uso de un sistema de control en tiempo real estudiando en detalle el tratamiento de piezas de acero con dos geometrías diferentes: una plana y otra circular. Se plantean las dificultades que plantea cada proceso y se explica como el uso combinado de modelos para simulación numérica y técnicas experimentales facilitan el conocimiento de lo que está sucediendo y sobre la influencia que las variaciones de los parámetros que intervienen provocan en el resultado final. Así mismo se aprecian las ventajas del uso del sistema de control en tiempo real porque obtiene resultados mas uniformes, mayor dureza con menor consumo de energía y asegura la repetibilidad de los resultados a la vez que sirve para asegurar la trazabilidad dentro de un sistema de control de calidad de las piezas así elaboradas.

Se proponen, finalmente, posibles líneas de trabajo futuras como sería la incorporación de otros sensores de temperatura para complementar la información en otros procesos como refusión y recubrimientos superficiales, uso de otros tipos de pirómetros menos sensibles a la emisividad de la superficie a tratar así como ampliar el estudio a casos con geometrías complejas o con propiedades del material mas extremas.



## Capítulo 1

# Introducción al procesamiento de materiales con láser

En este capítulo se trata de mostrar el estado del arte y las posibilidades de aplicación de los láseres en los procesos de tratamiento superficial en la industria actual. Se incluye una revisión de los sistemas láser más empleados y los tratamientos que se llevan a cabo a nivel industrial.

Una fuente láser es un haz luminoso de alta intensidad y direccionalidad. Poco después de su aparición en 1960 aparecieron las primeras aplicaciones industriales de los láseres, como el taladrado de rubíes para la fabricación de relojes. En la actualidad los sistemas láseres industriales se cuentan por millares. Se realizan tareas tan variadas como: corte, soldadura, mecanizado, marcado, taladrado y tratamientos superficiales (Recubrimientos, aleaciones, suavizado de superficies, temple, ablaciones). Fuera del ámbito industrial cada día surgen numerosas aplicaciones en el campo de la medicina,<sup>1</sup> comunicaciones, aplicaciones militares y muchas otras.

Sin embargo, los progresivos avances en tecnología láser desde la primera emisión láser (T. H. Maiman, 1960) junto con el estudio de nuevas aplicaciones posibles, han motivado que actualmente la utilización de los láseres tenga lugar en numerosos campos de operación con buenos resultados. Entre los campos en los que se aplica la tecnología láser se encuentran las comunicaciones por fibra óptica, la electrónica de consumo, en usos industriales, aplicaciones militares y muchos otros de diversa índole. Viendo los datos sobre el mercado mundial del láser [LASER FOCUS 2003, ventas año 2002] las ventas totales se incrementaron en el último año un 36 %. En la figura 1.1, se indica el reparto del mercado en las diferentes aplicaciones comparando con las ventas del año anterior, tanto para láseres de diodo como los de no-diodo. Mientras que en el mercado de los láseres de semiconductor o de diodo las aplicaciones en telecomunicaciones

---

<sup>1</sup> Cirugía ocular, traumatología, reumatología, neurología, urología, dermatología y cirugía plástica.

acaparan el 32 % de la facturación total del mercado, los sistemas de almacenamiento óptico de datos tienen una cuota del 19 % y siguen siendo los de mayor desarrollo. Entre todos los demás tipos de láseres de uso comercial, un 27 % corresponde a láseres para procesamiento de materiales y un 8 % para aplicaciones médico-terapéuticas. El resto de aplicaciones, siendo múltiples y de muy diferentes campos representa el 15 % restante del mercado. Las aplicaciones de corte siguen estando a la cabeza del mercado del láser,

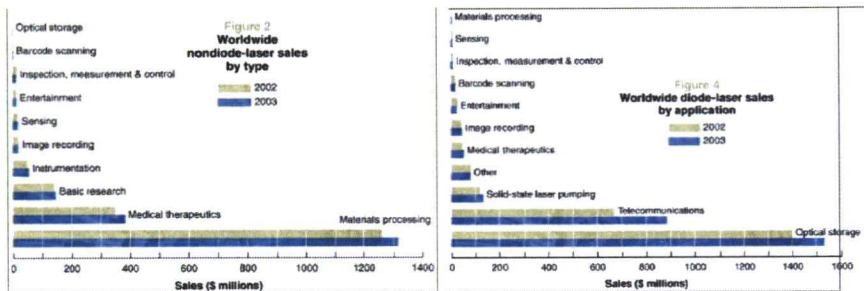


Figura 1.1: Mercado láser 2002 [LASER FOCUS 2003].

pero las aplicaciones de tratamientos superficiales tienen un enorme crecimiento. Al menos de la tercera parte de los equipos vendidos son fuentes láser de CO<sub>2</sub> combinadas con estaciones de trabajo, mientras que las ventas de equipos de arrays de diodos, Nd-YAG excitados por diodos y excímero van en una continua expansión.

## 1.1 Láseres e industria

El empleo del láser como instrumento tecnológico en el procesamiento de materiales está basado en la interacción de la luz láser con la materia. A través de esta interacción es posible variar la estructura, la composición y las capas más exteriores de los materiales. A pesar del bajo rendimiento energético de los sistemas láser, el interés del láser en la industria reside en la gran precisión y elevada calidad de los resultados obtenidos.

En los siguientes apartados se revisan los fundamentos de la utilización del láser como herramienta de producción y se hace una reseña histórica de la evolución del procesamiento de materiales con láser.

### 1.1.1 El láser como herramienta de producción

El interés de la aplicación de los láseres para el procesamiento de materiales reside en las siguientes ventajas importantes:

1. Elevada densidad de energía que se puede concentrar en una región localizada de un material, notablemente superior a la obtenible con otras herramientas. Esto permite alcanzar temperaturas muy altas en espacios de tiempo muy cortos, lo que posibilita el procesamiento de muy diversos materiales.
2. Ausencia de contacto entre la herramienta láser y el material que se está procesando, con ausencia en la práctica de inercia del láser, que permite un enfocado con una precisión muy buena. Por ello es posible aplicar los láseres al procesamiento rápido de formas complejas, siendo también posible la adaptación de técnicas de control automático.

Existen dos tipos de aplicaciones del láser atendiendo a la cantidad de energía que se precisa para el proceso. Por un lado se encuentran las aplicaciones que requieren aportes de energía relativamente pequeños (como el micromecanizado e ingeniería de semiconductores, impresión y lecturas ópticas y similares) que, en general, requieren controles muy precisos y estrictos. Por otro lado se encuentran las aplicaciones que necesitan un gran aporte energético para la realización de procesos macroscópicos (soldadura, corte y tratamientos térmicos) que son similares a otras operaciones convencionales en industrias mecánicas.

Atendiendo a las aplicaciones que requieren elevados aportes de energía, entre las que se encuentra el tratamiento térmico superficial de materiales metálicos, se pueden citar las siguientes ventajas de la aplicación industrial de los láseres de potencia:

- Flexibilidad

La flexibilidad de los láseres permite llevar a cabo una gran variedad de procesos, sobre geometrías arbitrarias, con una gran facilidad de automatización así como de integración y combinación.

- Rapidez de procesamiento y acabado de calidad

El procesamiento con láseres se caracteriza por una alta precisión y exactitud, sin esfuerzos mecánicos y en cortos tiempos. Sólo en casos contados es necesario algún mecanizado posterior.

- Concentración de potencia en el punto preciso



La concentración de potencia en el punto preciso caracteriza a los láseres por una elevada densidad de energía con una utilización dirigida y sin efectos térmicos importantes en las zonas próximas.

### 1.1.2 Historia del procesamiento de materiales con láseres

El procesamiento de materiales con láseres se desarrolló en los Estados Unidos a partir de los años sesenta, y con algo de retraso en Europa y en Japón. Esta tecnología se ha desarrollado en gran parte en Estados Unidos a través de inversiones de los departamentos de Defensa y de Energía mediante contratos y subcontratos con empresas industriales y transferencia de tecnología entre los sectores público y privado.

En una primera etapa se utilizaban láseres de estado sólido (láser de rubí y Nd:YAG) en aplicaciones para la industria electrónica. La integración del láser en el proceso corría a cargo del usuario que decidía implantarlo. Con el aumento de aplicaciones similares surgieron los sistemas dedicados de tipo estándar.

Durante el transcurso de los años 70 surge la necesidad de mayores aportes energéticos en determinadas aplicaciones, con lo que se desarrollan los láseres de CO<sub>2</sub> que rápidamente toman terreno frente a los láseres de estado sólido.

Los años 80 se han caracterizado por la tendencia a construir sistemas estandarizados de láseres de CO<sub>2</sub> de diversa potencia. En la actualidad se encuentran disponibles una gran variedad de estos sistemas con muy diversas características.

Se estima que un 60 % de las aplicaciones de procesamiento de materiales con láseres tiene lugar con sistemas comerciales. El resto de aplicaciones corresponde en su mayor parte a sistemas láser integrados directamente en el sistema de producción o a sistemas únicos para nuevas aplicaciones con especificaciones precisas para la aplicación correspondiente. Los principales usuarios de este sistema son las industrias aeronáutica, automovilística y de maquinaria pesada. Se han creado talleres láser que tienden a estructurarse en forma de instalaciones multiláser-multipuesto con estaciones de trabajo especializadas a las que se pueden dirigir haces láser de varias fuentes que pueden tener distintas características. Esto se combina con sistemas automatizados CAD/CAM. Existen células y sistemas de fabricación flexible que utilizan láseres de CO<sub>2</sub> y de Nd:YAG en procesos de producción. La aplicación más común es la de corte con láser, normalmente asociado con punzonadoras con controles numéricos computados. También se comienzan a utilizar sistemas para la soldadura láser que ofrecen perspectivas de gran interés principalmente por la velocidad del proceso y la pequeña distorsión térmica que introducen.

## 1.2 Sistemas láser

La palabra LASER está compuesta de las siglas de “*Light Amplification by the Stimulated Emission of Radiation*”.<sup>2</sup> Aunque la emisión estimulada ya fue predicha por Albert Einstein en 1917, el fenómeno láser en frecuencias ópticas fue producido por primera vez en 1960 de la mano de T. H. Maiman.

### 1.2.1 Principios del funcionamiento del láser

Cuando un conjunto de átomos idénticos se encuentra en equilibrio térmico a una temperatura  $T$ , [DORRONSORRO 1996] el cociente entre los niveles poblacionales de dos estados del sistema de energías  $E_2 > E_1$  sigue la relación de Boltzmann:

$$\frac{N_2}{N_1} = \exp\left(\frac{-(E_2 - E_1)}{kT}\right) \quad (1.1)$$

El número de átomos en cada nivel energético decrece rápidamente al crecer la energía asociada a los estados.

Al sufrir un átomo o molécula una transición energética entre dos estados permitidos, emite o absorbe un fotón de energía radiante igual a la diferencia de energías entre los dos estados  $\Delta E = E_2 - E_1 = h\nu_{12}$ .

Existen tres procesos elementales de transición energética:

- *Absorción estimulada*: un átomo absorbe un fotón y aumenta su nivel energético.
- *Emisión espontánea*: un átomo excitado emite un fotón y disminuye su nivel energético.
- *Emisión estimulada*: un átomo excitado sufre una transición electrónica por efecto de un fotón incidente, emitiendo otro fotón. El resultado son dos fotones idénticos en energía, fase, dirección y estado de polarización.

Las relaciones de Einstein describen las relaciones entre los parámetros de los tres procesos anteriores. Para una densidad de radiación incidente sobre el sistema de átomos, las emisiones estimuladas son igual de probables que las absorciones. En equilibrio termodinámico el número de emisiones estimuladas es mucho menor que el de emisiones espontáneas. La relación entre emisiones espontáneas y emisiones estimuladas es:

$$\frac{\text{Emisiones espontáneas}}{\text{Emisiones estimuladas}} = \exp\left(\frac{h\nu_{12}}{kT}\right) - 1 \quad (1.2)$$

---

<sup>2</sup> Amplificación de Luz por Emisión Estimulada de Radiación.

Como se deducirá en 1.3.2, cuando una onda electromagnética atraviesa un medio material, su intensidad decrece según la ley de Beer  $I(x) = I(0) \cdot \exp(-\alpha x)$ , siendo  $\alpha$  el coeficiente de absorción del material [ $\text{m}^{-1}$ ] y  $x$  la distancia recorrida. La relación de este coeficiente de absorción con las propiedades de la onda y del medio material se verán en 1.3.2. Si suponemos que en el medio hay átomos en dos estados de energía, el coeficiente de absorción es proporcional a la diferencia de poblaciones entre el nivel de energía inferior y el superior, siendo:

$$\alpha = (N_1 - N_2) \beta_{12} \nu_{21} \frac{n}{c} \quad (1.3)$$

donde  $N_1$  y  $N_2$  son el número de átomos por unidad de volumen en los dos estados,  $\beta$  un coeficiente proporcional a la constante de Einstein, y  $n$  el índice de refracción del medio. El coeficiente  $\alpha$  es proporcional a la diferencia de poblaciones entre el nivel inferior y el superior, por lo que es positivo en sistemas en equilibrio termodinámico ( $N_1 > N_2$ ), y negativo en caso de que el número de átomos en el estado de energía superior fuese mayor ( $N_1 < N_2$ ). Este último caso implicaría que la intensidad de la onda se amplifica al atravesar el medio.

Para que se dé la condición de no equilibrio  $N_2 > N_1$  es necesaria una inversión de la población. Esto se consigue con el bombeo del medio activo, que consiste en excitar los átomos para que ocupen los niveles de energía superior.

Existen diversos procedimientos de bombeo que responden a diversos esquemas, que dependen del número de niveles que se presentan en el medio durante el proceso. Un esquema típico es el de tres niveles, donde los átomos en el estado fundamental se excitan hasta un estado de energía superior del que decaen al nivel metaestable intermedio, desde el que se produce la transición láser hasta el estado fundamental.

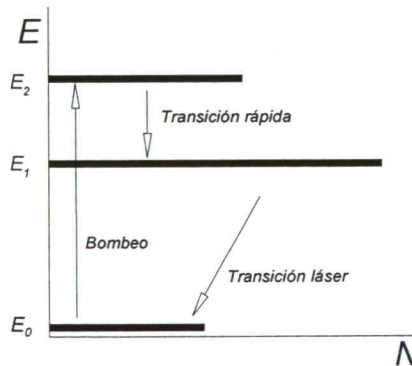


Figura 1.2: Esquema de sistema de tres niveles.

Los métodos de bombeo más comunes son el bombeo óptico y el bombeo eléctrico. El bombeo óptico se realiza mediante luz de gran potencia que es absorbida por el material activo, y es adecuado con medios activos de estado sólido y líquido. El bombeo eléctrico se emplea con láseres de medio activo gaseoso y de semiconductor, por medio descargas eléctricas en el medio activo.

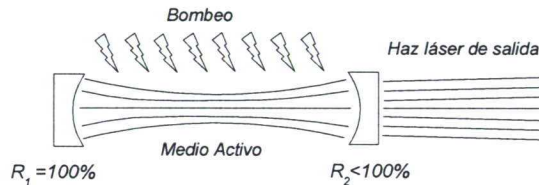


Figura 1.3: Elementos de un resonador óptico.

Dado que en el medio activo los niveles de amplificación óptica son muy bajos, se recurre a la realimentación óptica por un resonador óptico en el medio del cual se encuentra el medio activo. El resonador óptico consiste básicamente (ver figura 1.3) en un par de espejos enfrentados, que hacen que la radiación rebote entre ellos atravesando el medio activo numerosas veces.

Uno de los espejos del resonador óptico debe de permitir la extracción de parte de la energía láser que se produce en la cavidad, lo cual se consigue normalmente con un espejo de reflectancia menor del 100 %.

Para la producción del fenómeno láser de forma continua es necesario un nivel umbral de ganancia en la cavidad. Esto se da cuando la intensidad del haz láser al comienzo y al final de un camino completo de ida y vuelta dentro del resonador es la misma, es decir, las pérdidas igualan a la amplificación y se produce una situación estacionaria independiente del tiempo.

Los espejos del resonador deben proporcionar una condición de estabilidad a la cavidad. No es posible mantener una radiación colimada entre espejos planos de dimensión finita por efectos de difracción, por lo que se utilizan espejos esféricos cóncavos. La forma de los espejos debe de ser tal que el rayo permanezca en las proximidades del eje óptico del resonador, con lo que habrá bajas pérdidas y el resonador será entonces estable.

El rendimiento energético del láser se evalúa por medio de diferentes coeficientes de eficiencia, que son los siguientes:

- Coeficiente de eficiencia cuántica  $\eta_c$



- Coeficiente de eficiencia cuántica de bombeo  $\eta_b$
- Coeficiente de rendimiento electroóptico  $\eta_{eo}$
- Coeficiente de rendimiento global  $\eta_{global}$

Estos coeficientes tienen en cuenta las diversas pérdidas que se producen en la conversión de diferentes tipos de energía (eléctrica, óptica...) en energía luminosa en forma de haz de salida. Ésta conversión es poco eficiente, por lo que se genera calor que habrá que disipar.

### 1.2.2 Tipos de láseres

Cualquier tipo de láser consta de tres elementos; el medio activo, el mecanismo de excitación y el resonador óptico. La función de estos tres elementos se ha descrito en el apartado anterior.

En general la clasificación de los láseres suele hacerse en base a la naturaleza del medio activo, aunque también se pueden realizar otras clasificaciones según el rendimiento energético o eficiencia, la potencia, la longitud de onda, o el modo de funcionamiento (pulsado o continuo).

Atendiendo a la naturaleza del medio activo, los láseres se pueden clasificar en tres grupos según el estado de agregación del medio activo (sólido, líquido o gaseoso).

#### Láseres de estado sólido

Los láseres de estado sólido se caracterizan por ser su medio activo un cristal con iones de impurezas. Los láseres de estado sólido más ampliamente utilizados son los de Nd:YAG y los de rubí, aunque los de semiconductor están en un gran desarrollo. El bombeo óptico se realiza mediante lámparas de gran potencia o mediante otros láseres.

Los principales inconvenientes que presentan los láseres de estado sólido son su limitada potencia y su pobre eficiencia. Las potencias características de estos láseres son del orden de algunos kilovatios y su eficiencia se sitúa generalmente entre un 0.1 % y un 1 %. Estas limitaciones merman las posibilidades de aplicación industrial de los láseres de estado sólido, aunque el desarrollo que están experimentando los láseres de Nd:YAG hace que sean cada vez más competitivos en diversas aplicaciones, por lo que su implantación crece de forma paulatina.

Las ventajas de este tipo de láseres se encuentran en su simplicidad y en su compactidad. Son láseres de coste relativamente reducido y de mantenimiento sencillo, pues no presentan los problemas de otros láseres como la contaminación del medio activo.

### Láseres de estado líquido

Los láseres de estado líquido, también llamados láseres de colorantes, emiten una radiación en el espectro visible, pudiendo ser la longitud de onda a la que emiten de muy diversos valores. El medio activo es un compuesto químico derivado de compuestos orgánicos de elevada toxicidad y peligrosidad.

Una de las aplicaciones típicas de los láseres de estado líquido es la excitación de láseres de estado sólido, lo que redundaría en un aumento de rendimiento, pues es posible excitar el láser de sólido con radiación de la longitud de onda más apropiada. Sin embargo, la aplicación de los láseres de estado líquido directamente en procesos industriales es escasa.

### Láseres de estado gaseoso

Los láseres de estado gaseoso son aquellos cuyo medio activo es un gas. Los más desarrollados y utilizados en procesos industriales son el láser de  $\text{CO}_2$  y en menor medida el láser de  $\text{CO}$ , que todavía está siendo desarrollado, pero presenta buenas perspectivas de aplicación en numerosos procesos.

Las elevadas potencias a las que opera y su gran rendimiento (comprendido entre un 10 % y un 20 %) son las principales características de los láseres de  $\text{CO}_2$ . Es el láser que más se emplea en aplicaciones industriales.

En el láser de  $\text{CO}_2$  el medio activo es una mezcla de  $\text{CO}_2$ , He y  $\text{N}_2$ . Las proporciones de estos gases en el medio activo varían entre los diversos láseres, pero el gas que se presenta en una menor proporción es, curiosamente, el dióxido de carbono. Este gas es el que realiza la emisión estimulada de radiación, que tiene lugar entre niveles vibro-rotacionales de la molécula de  $\text{CO}_2$ , por lo que le da el nombre al láser. La función del nitrógeno es la de transmitir energía a la molécula de  $\text{CO}_2$ , lo que aumenta el rendimiento del bombeo. El helio se utiliza como gas refrigerante por su gran conductividad y poder de disipación de la energía térmica. El modo de distribución transversal de energía (ver página 19) en el que pueden operar estos láseres es un modo muy bajo, próximo al fundamental TEM<sub>00</sub>, que presenta una distribución transversal de energía gaussiana.

La gran desventaja del láser de  $\text{CO}_2$  es su longitud de onda, de 10.6  $\mu\text{m}$ , en el infrarrojo. En el procesamiento de metales, la absorción de energía a esta longitud de onda es muy baja, por lo que se debe recurrir a métodos para aumentar la absorción del material.

Los láseres de estado gaseoso son láseres complejos y caros. Al ser el medio activo un gas se degrada progresivamente por la contaminación del gas. Para evitar esto se utiliza un circuito de aporte de gas en la cavidad resonante, con lo que la instalación

del láser se encarece. Existen diversos tipos de circuitos de aporte para la renovación del gas en la cavidad resonante y para la refrigeración del gas. Se distingue entre láseres de flujo axial rápido y láseres de flujo transversal, según sea el movimiento del gas aportado en la cavidad resonante respecto al eje de la misma.

El medio activo en este caso se bombea mediante descargas eléctricas entre electrodos en el interior de la cavidad resonante. Se puede realizar el bombeo mediante corriente continua o mediante radiofrecuencia. El bombeo mediante corriente continua proporciona un mayor rendimiento. Sin embargo se encuentra más extendido el uso de láseres de estado gaseoso con bombeo mediante radiofrecuencia, pues mejora la capacidad de pulsación, reduce el coste de mantenimiento al aumentar el aprovechamiento del gas y disminuir los problemas de contaminación de los electrodos y disminuye las fluctuaciones de potencia a la salida del resonador.

### Láseres de excímeros

El medio activo de los láseres de excímeros se basa en gases. Sin embargo no se suelen agrupar con los láseres de medio gaseoso, pues presentan unas características muy diferenciadas. El medio activo en este tipo de láseres es una mezcla de un gas noble con un halógeno. Cuando la mezcla se excita mediante descargas eléctricas el gas noble y el halógeno forman el haluro correspondiente.

Los láseres de excímero emiten radiación de una longitud de onda corta, en el ultravioleta. En esta longitud de onda los metales tienen una reflectancia muy baja, por lo que absorben prácticamente toda la radiación que incide sobre ellos. Esto representa una gran ventaja de los láseres de excímero sobre otros tipos de láseres. También es posible lograr una gran resolución y detalle con este tipo de láseres gracias a su corta longitud de onda.

En el estado actual de la tecnología láser, tan sólo es posible construir láseres de excímero que operen en modo pulsado. Esto impide su aplicación en procesos en los que sea necesario el funcionamiento en modo continuo.

Los láseres de excímero son equipos caros y además precisan un mantenimiento elevado. Se necesita un circuito de realimentación de gas, pues este se contamina al igual que en los láseres de gas, como el de  $\text{CO}_2$ . Por este motivo la implantación industrial de este tipo de láseres es limitada.

### Modos de funcionamiento: continuo y pulsado

Los láseres pueden emitir la radiación en modo continuo o pulsado.

El funcionamiento del láser en modo continuo se caracteriza por un nivel continuo de potencia emitida. Para que tenga lugar este tipo de funcionamiento el bombeo del

medio activo debe de realizarse de forma continua. Con ello se logran estabilidades de potencia de salida del orden del 2 % en láseres de CO<sub>2</sub> (otros tipos de láseres pueden ser mas estables). Sobre la estabilidad de la potencia de salida influyen la refrigeración del medio activo, la uniformidad de la descarga eléctrica en láseres de estado gaseoso, homogeneidad del medio activo, etc.

El funcionamiento continuo se utiliza en numerosos procesos industriales como en aplicaciones de corte, soldadura o tratamientos térmicos de metales.

El funcionamiento en modo pulsado se caracteriza por las variaciones periódicas de la potencia. El funcionamiento pulsado se caracteriza con la duración temporal del pulso, la potencia de pico, la energía del pulso y la frecuencia de repetición de los pulsos. Estas variables permiten generar un gran número de pulsos de diferentes características.

El funcionamiento en modo pulsado es muy utilizado en aquellos casos en los que se necesita disminuir la potencia media suministrada sin variar los niveles de densidad de potencia, como en el corte de esquinas agudas en chapa, o cuando se necesitan potencias de pico elevadas, como en el taladrado o en el marcado.

La generación de pulsos se consigue por diversas vías, como el pulsado por obturación del haz de salida o el pulsado por bombeo.

### 1.2.3 Propiedades del haz

La radiación emitida por los láseres en forma de ondas electromagnéticas presenta un campo eléctrico y uno magnético asociado que verifican la ecuación de ondas. La forma de las ecuaciones de Maxwell para materiales isótropos no magnéticos, de constante dieléctrica  $\epsilon_r$  y conductividad  $\sigma$  es la siguiente :

$$\nabla \cdot \vec{E} = 0 \quad (1.4)$$

$$\nabla \cdot \vec{H} = 0 \quad (1.5)$$

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{1}{\epsilon_0 c^2} \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} \quad (1.6)$$

$$\nabla \times \vec{H} = \epsilon_0 \epsilon_r \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} + \sigma \vec{E} \quad (1.7)$$

Partiendo del rotacional de  $\vec{E}$  (ecuación 1.6) y teniendo en cuenta la relación :

$$\nabla \times (\nabla \times \vec{E}) \equiv \nabla (\nabla \cdot \vec{E}) - \nabla^2 \vec{E}$$



reemplazando el resultado de lo anterior en la ecuación (1.7), se obtiene la ecuación de onda :

$$\nabla^2 \vec{E} = \frac{\epsilon_r}{c^2} \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} + \frac{\sigma}{\epsilon_0 c^2} \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \quad (1.8)$$

Las ondas planas son un tipo de soluciones de la ecuación de ondas, y su expresión matemática es del tipo:

$$E(x, t) = E_0 \cos(\omega t - kx + \phi) \quad (1.9)$$

con una expresión similar para el campo magnético.

La expresión 1.9 corresponde a una onda plana monocromática de extensión infinita que se propaga en la dirección  $x$ . En las ondas planas los frentes de onda son superficies planas infinitas perpendiculares a la dirección de propagación de la onda.

En la expresión de la solución de la ecuación de ondas correspondiente a una onda plana interviene únicamente una sola frecuencia. Esto se debe a que las ondas planas son perfectamente monocromáticas.

Los campos eléctrico y magnético asociados a las ondas luminosas reales no se corresponden con el de las ondas planas, sino que son superposiciones de ondas planas o expresiones de mayor complejidad. Esto se debe a que las ondas reales, entre las que se encuentran la correspondiente a la radiación láser, no son en ningún caso perfectamente monocromáticas ni tampoco los frentes de onda son perfectamente planos.

### Monocromaticidad

Las ondas luminosas reales vibran con varias frecuencias, por lo que la monocromaticidad perfecta no deja de ser una situación ideal que no es posible alcanzar en la realidad. Las ondas reales están compuestas por paquetes de ondas, que se caracterizan por su anchura espectral y temporal.

La anchura espectral depende del rango de longitudes de onda que presenta una onda real. Dicha anchura espectral varía de unas fuentes luminosas a otras. La luz que emiten las fuentes luminosas es un conjunto de colores en forma de bandas continuas o un conjunto de colores discretos.

Los láseres que funcionan en un único modo se caracterizan por valores de anchura espectral considerablemente inferiores a los valores que presentan otros tipos de fuentes luminosas, por lo que el comportamiento de la radiación láser se encuentra más próximo al de las ondas planas que otros tipos de fuentes.

La gran monocromaticidad de la radiación emitida por las fuentes láser se debe a que en los generadores láser tan sólo se amplifican las ondas con una frecuencia próxima a la frecuencia característica del tipo del medio activo empleado en el láser.

Además de esto, el resonador óptico de la cavidad láser realiza una selección de las frecuencias de oscilación.

### Coherencia

Cuando dos puntos de una onda guardan una relación de fase constante dichos puntos son coherentes. La coherencia puede ser temporal o espacial.

La coherencia temporal tiene lugar cuando existe una correlación de la fase de la onda en un punto espacial determinado alcanzado por la onda en dos instantes temporales distintos. Si en un punto determinado se considera el campo eléctrico en dos instantes diferentes, se define el tiempo de coherencia como el máximo valor del intervalo de tiempo para el que la diferencia de fase entre el campo en ambos puntos se puede predecir. Las fuentes láser se caracterizan por coherencias temporales muy elevadas, con tiempos de coherencia del orden de  $10^{-6}$  s en láseres continuos monomodo. Las fuentes luminosas convencionales presentan unos tiempos de coherencia del orden de  $10^{-10}$  s ó  $10^{-12}$  s. La coherencia temporal está íntimamente relacionada con la monocromaticidad, por lo que las fuentes con valores de coherencia elevadas también se caracterizan por una monocromaticidad elevada.

La coherencia espacial se refiere a la relación de fase entre puntos distintos en una sección transversal del haz luminoso. La coherencia espacial perfecta es aquella en la que permanece constante en el tiempo la diferencia de fase entre los campos en dos puntos cualquiera de una sección transversal. La coherencia espacial perfecta es una situación ideal que no se presenta en la práctica, pues para que entre dos puntos exista una coherencia espacial éstos tienen que encontrarse en un área limitada, a la que se denomina área de coherencia, por lo que la coherencia espacial es parcial. Las fuentes luminosas convencionales se caracterizan por un área de coherencia del orden de  $10^{-4}$  mm<sup>2</sup>, mientras que el láser se caracteriza por áreas de coherencia del orden de su sección transversal, que puede ser de 1 mm<sup>2</sup>. La coherencia espacial influye en la divergencia del haz, por lo que las fuentes luminosas con valores del área de coherencia elevados presentarán una gran direccionalidad.

### Direccionalidad

En el láser solamente las ondas que se propagan a lo largo del eje de la cavidad resonante o en una dirección muy próxima son amplificadas por el medio activo y contribuyen al haz que sale del resonador, por lo que la radiación láser es direccional.

La direccionalidad se mide con el ángulo de divergencia. La divergencia típica de los láseres es del orden de 1 mrad, con lo que el tamaño del haz aumenta 1 mm por kilómetro de propagación.

En las fuentes luminosas de incandescencia o tubos de descarga el ángulo de divergencia suele situarse entre 0.1 rad y 0.01 rad en los mejores casos. En cambio el ángulo de divergencia del láser puede encontrarse entre  $10^{-3}$  rad y  $10^{-6}$  rad. Esta diferencia se debe a que en el láser la focalización de los espejos en la cavidad resonante confina la radiación láser en torno al eje óptico, con lo que el frente de ondas es plano en la cintura del haz. En las fuentes luminosas convencionales no existe control de los frentes de onda y la divergencia es mayor.

### Polarización

La radiación láser es una onda electromagnética, por lo que en cada punto del espacio que alcanza tiene asociado un valor de los vectores del campo eléctrico  $\vec{E}$  y del campo magnético  $\vec{H}$ . Los vectores de los campos eléctrico y magnético son perpendiculares a la dirección de propagación de la onda y perpendiculares entre sí.

La dirección de vibración del campo eléctrico se conoce como dirección de polarización. La luz que emiten las lámparas convencionales tiene un estado de polarización aleatorio, por lo que el campo eléctrico asociado a las ondas emitidas por las mismas no presenta una dirección de vibración preferencial, y el vector campo cambia de orientación de forma aleatoria en el tiempo. Por el contrario, las ondas luminosas producidas por los láseres se caracterizan por un campo eléctrico con una dirección de vibración determinada.

Existen diversas formas de polarización, entre las que destacan la polarización lineal y la polarización elíptica [DORRONSORRO 1996]:

- Polarización lineal

La polarización lineal es aquella que tiene lugar cuando el campo eléctrico vibra en una dirección constante en el tiempo. En el caso de una onda plana con polarización lineal que se propaga en la dirección  $z$ , el campo eléctrico sólo tiene componentes en los ejes  $x$  e  $y$ , y los valores de las componentes de dicho campo serán de la forma:

$$\begin{aligned} E_x &= a_x \cos(wt - kz) \\ E_y &= a_y \cos(wt - kz) \end{aligned} \quad (1.10)$$

donde  $a_x$  y  $a_y$  son las amplitudes de oscilación en las direcciones  $x$  e  $y$  (ambas expresadas en  $V m^{-1}$ ).

- Polarización elíptica

Cuando la polarización de la radiación electromagnética es elíptica existe un desfase entre las componentes del campo eléctrico en las direcciones  $x$  e  $y$ . El vector del campo

eléctrico describe una elipse a lo largo del tiempo para un plano de  $z$  constante. Las componentes del campo eléctrico se pueden expresar como:

$$\begin{aligned}E_x &= a_x \cos (wt - kz) \\E_y &= a_y \cos (wt - kz + \delta)\end{aligned}\tag{1.11}$$

Un caso particular de la polarización elíptica es la *polarización circular*, que tiene lugar cuando  $a_x$  y  $a_y$  son iguales y el desfase  $\delta$  es igual a  $\pi/2$ . La polarización circular es muy importante en los procesos de corte y soldadura de materiales metálicos con láser.

- Métodos para producir luz polarizada

Entre estos métodos destacan la polarización por reflexión y la polarización por absorción.

#### Polarización por reflexión

Al incidir un haz de luz polarizada aleatoriamente sobre la superficie de separación entre dos medios, la componente perpendicular al plano de incidencia se refleja más que la componente paralela, pues la reflectancia de la superficie es distinta para las dos componentes y varía con el ángulo de incidencia. Existe un ángulo de incidencia, conocido como ángulo de Brewster, para el cual la reflectancia de la componente paralela es nula, por lo que esta componente se transmite completamente a través de la superficie de separación. Cuando esto sucede el haz reflejado y el haz refractado forman un ángulo de  $\pi/2$ .

#### Polarización por absorción

La polarización por absorción se realiza mediante la absorción selectiva de una componente de la luz polarizada aleatoriamente. Para ello el haz luminoso debe de atravesar sustancias como turmalinas o láminas polaroid.

- Estado e importancia de la polarización

La radiación que producen los generadores láser en general se encuentra polarizada linealmente, pues se colocan superficies en ángulo de Brewster en el interior de la cavidad óptica. En los láseres de estado sólido, cuyo medio activo es una barra de cristal, se tallan los extremos de la barra con el ángulo de Brewster.



En los láseres de gas el tubo de la cavidad resonante se encuentra sellado por ventanas colocadas con la inclinación adecuada. En ambos casos la componente del campo eléctrico paralela al plano de incidencia se transmite fuera del medio activo hacia los espejos de la cavidad y vuelve al medio activo prácticamente sin pérdidas. Por el contrario, la componente ortogonal del campo eléctrico se atenúa y con ello deja de oscilar en la cavidad resonante. La componente del campo eléctrico contenida en el plano de incidencia es la única que contribuye al haz de salida, que es linealmente polarizado.

La importancia de la polarización del haz depende de la aplicación. En el caso del corte de materiales metálicos la polarización lineal produce una diferencia de la calidad y de la velocidad de corte según el ángulo entre la dirección de avance del haz y el plano de polarización.

### Modos en cavidades resonantes

En la cavidad resonante de los láseres se producen pérdidas por difracción, pues son abiertas. Además, dado que el orden de magnitud de sus dimensiones es mayor que el de la longitud de onda de la radiación, las frecuencias resonantes se encuentran muy próximas.

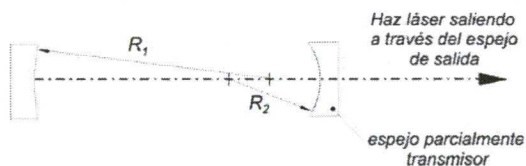


Figura 1.4: Esquema resonador estable.

En la cavidad se emplean espejos planos o esféricos, separados por una distancia mucho mayor que las dimensiones transversales de la cavidad. Los resonadores con espejos planos son difíciles de alinear y resultan inestables por lo que se suelen utilizar cavidades resonantes formadas por espejos esféricos (ver figura 1.4). Las configuraciones más comunes son el resonador concéntrico (dos espejos con el centro de curvatura coincidente), el resonador confocal (espejos con focos coincidentes) y los resonadores hemiconfocal y hemiesférico (un espejo esférico y otro plano en su foco o en el centro de curvatura). Todas estas configuraciones son estables.

Las frecuencias de las ondas que pueden permanecer estacionarias en una cavidad resonante dependen de la configuración de los espejos y de las dimensiones de la cavidad. Entre las ondas que pueden resonar en una cavidad existen modos longitudinales

o axiales que corresponden a ondas que se propagan a lo largo del eje, y modos oblicuos que corresponden a ondas con una dirección de propagación formando un ángulo pequeño con el eje.

Los modos pueden tener distintas frecuencias, y se diferencian por la forma geométrica de las distribuciones de intensidad, por lo que en ocasiones se les llama modos espaciales. Los distintos modos espaciales se designan por la notación  $TEM_{uv}$ ,<sup>3</sup> similar a la designación de las microondas, y donde  $u$  y  $v$  son el número de ceros de la distribución de intensidad en las direcciones  $x$  e  $y$  del plano perpendicular al eje de la cavidad.

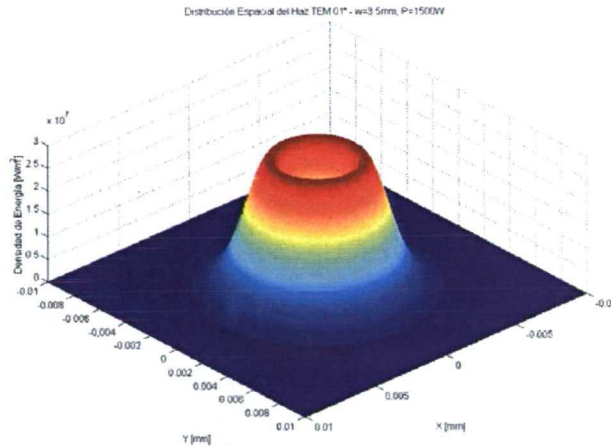


Figura 1.5: *Distribución de energía de un TEM01\*.*

El modo espacial fundamental es el  $TEM_{00}$ , que se caracteriza por una distribución de intensidad gaussiana (su máxima intensidad coincide con la del eje del láser) y sus pérdidas de difracción son las mínimas. Es el modo espacial que presenta la menor divergencia y que puede ser enfocado en un círculo de menos diámetro. En algunos láseres se consigue que la emisión sea sólo en el modo  $TEM_{00}$  por las pérdidas mayores por difracción de modos superiores. El equipo utilizado en este trabajo presenta una distribución  $TEM_{01}^*$  cuya distribución es similar a la de la figura 1.5.

En los láseres monomodo la frecuencia del láser es única. En estos láseres se introducen dispositivos selectores de frecuencia en la cavidad.

El factor  $Q$  o factor de calidad de la cavidad resonante es una de las magnitudes

<sup>3</sup>El término  $TEM$  significa que  $\vec{E}$  y  $\vec{H}$  son perpendiculares a la dirección de propagación.

que se utilizan para indicar las características de las cavidades, y se define como:

$$Q = w \cdot \frac{\text{Energía almacenada}}{\text{Energía perdida por segundo}} \quad (1.12)$$

que también se puede expresar de la forma:

$$Q = w \cdot \frac{U}{\frac{-dU}{dt}} \quad (1.13)$$

donde  $U$  es la energía almacenada y  $w$  es la frecuencia. Un valor del factor  $Q$  típico para un láser de gas es del orden de  $1.6 \times 10^8$ .

Una técnica para producir un funcionamiento pulsado del láser es el “ $Q$  switching” o conmutación de  $Q$ . Consiste en la introducción de pérdidas deliberadas en la cavidad resonante, que hacen descender el factor  $Q$  hasta que cesa la oscilación. Haciendo que el valor de  $Q$  se recupere en un instante de tiempo pequeño, se genera un impulso láser muy potente por la energía acumulada en el medio activo.

Algunos tipos de láseres tienen una ganancia tan elevada que no se necesita una cavidad resonante para producir la emisión del haz láser. Estos láseres se conocen como láseres superradiantes, y un ejemplo es el láser de  $N_2$ , que emite en el ultravioleta.

#### 1.2.4 Sistemas ópticos de conformado y distribución de intensidad del haz

El haz láser es manipulado por sistemas ópticos para transportarlo desde la salida del resonador hasta la zona de interacción con la pieza, pudiendo ser focalizado y conformado. Los sistemas ópticos se componen normalmente de espejos y lentes. En el caso de láseres de potencias superiores a los 2 kW no se utilizan lentes debido a que no podrían soportar el calentamiento que produciría una energía de esa magnitud, ya que en la práctica se absorbe parte de la energía que atraviesa la lente.

En los procesos de tratamiento térmico superficial se busca que la distribución del haz en la superficie de incidencia sea lo más homogénea posible, por lo que el modo de distribución del haz a la salida del resonador no suele ser el más adecuado. En ocasiones se utilizan dispositivos que permiten modificar la distribución transversal de energía. Entre estos dispositivos se encuentran espejos facetados, espejos osciladores, integradores de haz o calidoscópicos. Estos dispositivos presentan el inconveniente de que producen pérdidas significativas por absorción de la radiación.

Los *elementos ópticos* más utilizados industrialmente son los siguientes:

1. Lentes: concentran o dispersan el haz por la refracción que sufre éste al pasar por un medio de diferente índice de refracción. Según su comportamiento las lentes pueden ser convergentes o divergentes, y pueden utilizarse aisladamente o como parte de sistemas ópticos completos.

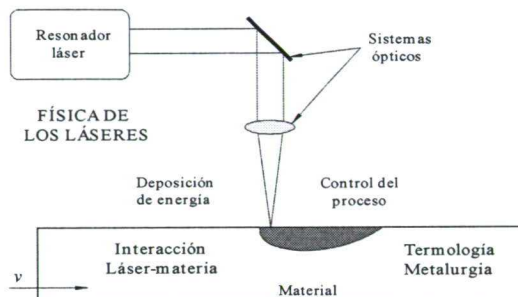


Figura 1.6: *Tecnologías que intervienen en el proceso.*

2. Espejos: son empleados para reflejar el haz, y pueden ser planos, convergentes o divergentes, con lo que también pueden utilizarse para focalizar o defocalizar el haz.
3. Divisores de haz: reflejan una parte del haz y transmiten la otra. Con ellos se consiguen distintas zonas de trabajo partiendo de un solo haz láser.

### 1.3 Interacción Láser-Materia

El objetivo de este apartado es la revisión de los aspectos teóricos básicos que tienen lugar cuando un haz láser incide sobre la superficie de un material, para un mejor conocimiento de los procesos físicos que afectan a los procesos de tratamiento térmico superficial de materiales con láser.

En este sentido, se trata en primer lugar, la fenomenología de la interacción láser-materia y su caracterización. Se definen los parámetros característicos, destacándose el coeficiente de absorción del material y la absortancia de su superficie, así como la influencia de las diferentes variables, tanto del sistema láser como de los propios materiales, que intervienen en el proceso de interacción.

A continuación, se estudia la propagación de ondas electromagnéticas en la materia, relacionándola con las propiedades macroscópicas de los materiales, definiendo las ecuaciones que determinan el régimen de transferencia de energía establecido.

Finalmente se revisan las propiedades que debemos tener en cuenta de los materiales que se pretendan procesar, insistiendo sobre todo en los aceros.

Al enumerar todos estos aspectos, se evidencia el carácter multidisciplinar de los procesos de tratamiento térmico superficial de materiales con láser que se representa en la figura 1.6.



El procesamiento de materiales con láser consiste en la absorción de la radiación láser por parte del material, con lo que se eleva su temperatura y se puede modificar su estructura o estado dependiendo del ciclo térmico seguido. La cantidad de radiación absorbida por la superficie del material, a la longitud de onda del láser, determina el calentamiento del material para una potencia y una distribución de intensidad del haz láser determinadas. Lo que absorbe la superficie del material depende de numerosos factores: propiedades ópticas del material, estado de la superficie, temperatura, velocidad de calentamiento, intensidad de la radiación, etc.

### 1.3.1 Introducción

Al incidir un haz láser sobre un material con una intensidad determinada (ver figura 1.7), una parte se reflejará (energía reflejada), otra parte se transmitirá (energía transmitida) y otra se absorberá (energía absorbida). La energía absorbida es proporcional al coeficiente de absorción  $\alpha$ , la energía reflejada es proporcional al coeficiente de reflexión  $\rho$ , y la energía transmitida es proporcional al coeficiente de transmisión  $\tau$ .

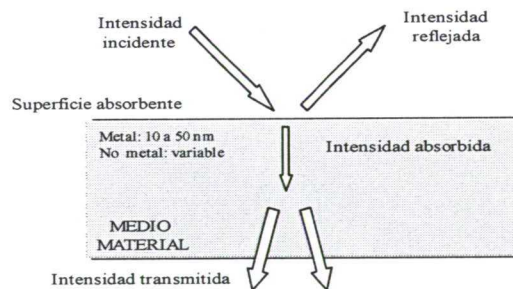


Figura 1.7: Representación de los flujos de energía en la interacción.

Planteando las ecuaciones para el estado de equilibrio, se obtiene que la radiación incidente es igual (ver 1.14) a la suma de las radiaciones absorbida, reflejada y transmitida.

$$E_i = E_\alpha + E_\rho + E_\tau \quad (1.14)$$

Aplicando los coeficientes correspondientes, se obtiene :

$$\alpha + \rho + \tau = 1 \quad (1.15)$$

En apartados posteriores se estudiará la propagación de la radiación en los metales. Se verá que la distancia de propagación de la radiación láser en materiales metálicos

es prácticamente despreciable, por lo que se considerará el coeficiente de transmisión  $\tau$ , nulo. Esto es, los materiales metálicos se comportan como cuerpos opacos a la radiación láser y en para ellos la expresión 1.15 se reduce a la 1.16 :

$$\alpha + \rho = 1 \quad (1.16)$$

Esta expresión implica que los coeficientes de absorción y reflexión son factores complementarios, por lo que si una superficie presenta baja absorción, reflejará en gran parte la radiación incidente.

La absorción de la radiación del láser por parte del material es una parte muy crítica del procesamiento de materiales con láser, y está determinada por las propiedades ópticas y por el comportamiento de los materiales al ser sometidos a una radiación intensa.

### 1.3.2 Propagación de ondas electromagnéticas en la materia

La teoría electromagnética de la luz, desarrollada por Maxwell [REITZ 1996] permite estudiar la propagación de una onda luminosa dentro de un medio material determinado. El comportamiento de una onda electromagnética se caracteriza por los vectores intensidad del campo eléctrico  $\vec{E}$  y del magnético  $\vec{H}$ . En el caso de una onda electromagnética plana monocromática que se propaga en un medio absorbente, la solución del sistema constituido por las ecuaciones de Maxwell para el campo eléctrico es la siguiente :

$$\vec{E} = \vec{E}_0 \cdot e^{i(\omega t - \vec{\kappa} \cdot \vec{r})} \quad (1.17)$$

donde  $E_0$  es la amplitud del campo;  $\omega = 2\pi\nu = \frac{2\pi u}{\lambda}$ , es la pulsación de la onda;  $u$ , la velocidad de la luz en el medio;  $\lambda$ , es la longitud de onda;  $|\vec{\kappa}| = \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{\omega \hat{n}}{u}$ , es el módulo del vector de onda;  $\hat{n} = n + ik$ , es el índice de refracción complejo del medio, que sustituye al índice de refracción real definido para un medio no absorbente,  $n$  es el índice de refracción y  $k$  es el coeficiente de extinción.

Los parámetros ópticos de la onda ( $n$  y  $k$ ) se relacionan con el índice complejo del medio mediante las expresiones:

$$n^2 - k^2 = \varepsilon \mu c_0^2 \quad (1.18)$$

$$2nk = c_0^2 \frac{\mu \gamma}{\omega} \quad (1.19)$$

en las que  $\varepsilon$  es la permitividad dieléctrica,  $\mu$  es la permeabilidad magnética,  $c_0$  es la velocidad de la luz en el vacío y  $\gamma = \left[1 - \left(\frac{u}{c_0}\right)^2\right]^{-\frac{1}{2}}$ .

El campo magnético presenta una expresión análoga a la del campo eléctrico [LÓPEZ 1999]. Las amplitudes de los campos eléctrico y magnético se encuentran relacionadas por la expresión:

$$\vec{H}_0 = \vec{E}_0 n \varepsilon_0 c \quad (1.20)$$

donde  $\varepsilon_0$  es la permitividad dieléctrica del vacío. El campo eléctrico y el magnético tienen una cantidad de energía promedio similar. La ecuación 1.21 nos da la fuerza que la onda electromagnética ejerce sobre un electrón

$$\vec{f} = -e \left( \vec{E} + \frac{n}{c_0} \vec{v} \wedge \vec{H} \right) \quad (1.21)$$

Puesto que  $v$  es la velocidad del electrón y  $c_0$  es la velocidad de la luz,  $v/c_0$  es muy pequeño y la fuerza debida al campo magnético es muy pequeña. El término  $-eE$ , correspondiente al campo eléctrico es, en la práctica, el responsable de todo el fenómeno que a continuación describiremos.

Durante la propagación en el medio material, la onda electromagnética se amortigua cediendo energía durante una longitud más o menos grande. La energía de la onda en el caso de propagación según el eje  $Oz$  viene dada por la expresión:

$$I = |\vec{E}|^2 = E_0^2 \cdot \exp \left[ i\omega \left( t - \frac{\hat{n}}{c} z \right) \right] \cdot \exp \left[ -i\omega \left( t - \frac{\hat{n}}{c} z \right) \right] \quad (1.22)$$

que se reduce a la:

$$I = E_0^2 \cdot \exp \left( -2 \frac{\omega k}{c} z \right) \quad (1.23)$$

El término exponencial describe la atenuación energética de la onda. En el vacío la atenuación es nula, esto es, su *coeficiente de extinción*  $k$  es nulo, o dicho de otra manera: la energía electromagnética de la radiación se conserva en el caso de propagación libre. Como ya vimos en 1.2.1, la disminución energética de la onda que se propaga en un medio material se puede caracterizar por un *coeficiente de absorción*  $\alpha$ , ahora relacionado con las propiedades de la onda y del medio:

$$\alpha = 2 \frac{\omega k}{c} \quad (1.24)$$

Consideremos ahora [DORRONSORRO 1996] que tenemos una onda electromagnética colimada (frentes de onda planos) y monocromática (correspondiente a una sola longitud de onda) y suponiendo que esta onda tiene una sección transversal unidad y que atraviesa un medio material homogéneo como se representa en la figura 1.8

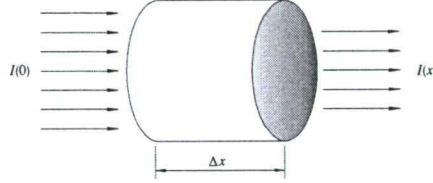


Figura 1.8: Absorción de la radiación en un medio material.

La variación de intensidad que experimenta la onda es, en primera aproximación, proporcional a la intensidad incidente y al camino recorrido por la onda dentro del medio material, según :

$$\Delta I = I(x) - I(0) = -\alpha \cdot I(0) \cdot \Delta x$$

donde  $I$  es la intensidad de la onda [ $\text{W m}^{-2}$ ];  $\Delta x$  espesor medio del material medido en la dirección de propagación de la onda [m]; y  $\alpha$ , el coeficiente de absorción [ $\text{m}^{-1}$ ].

En forma diferencial :

$$\frac{dI(x)}{dx} = -\alpha \cdot I(x)$$

que, integrada, queda :

$$I(x) = I(0) \cdot \exp(-\alpha \cdot x) \quad (1.25)$$

Expresión conocida como ley de Beer-Lambert. La constante  $\alpha = -\frac{1}{I} \frac{dI}{dx}$  es una constante positiva conocida como *coeficiente de absorción* del material. De acuerdo con la expresión 1.25 la intensidad de la onda disminuye a medida que avanza por el medio material.

La distancia de propagación para la cual la energía de la onda incidente decrece por un factor  $e$  ( $\approx -63.21\%$ ) es :

$$\delta_a = \frac{1}{\alpha} = \frac{c}{2\omega k} = \frac{\lambda}{4\pi k} \quad (1.26)$$

donde  $\delta_a$  es la *longitud de atenuación* [m] (ó longitud de absorción) de la onda. Para los metales el *coeficiente de extinción*  $k$  es mayor que la unidad por lo que la onda solo puede penetrar a una profundidad del orden de la longitud de onda de la radiación o menos.

En la tabla 1.1 se recogen valores de los índices de refracción y coeficientes de extinción así como las longitudes de atenuación de diversos materiales para las longitudes de onda de los láseres de Nd:YAG y  $\text{CO}_2$  a temperatura ambiente [CAILLIBOTTE 1992] y en el caso del hierro, también a temperatura de  $1536^\circ\text{C}$  [HÜGEL 1993].



Tabla 1.1: *Propiedades ópticas de algunos materiales a temperatura ambiente.*

Material	n		k		$\delta_a$ ( $\mu\text{m}$ )	
	1.06 $\mu\text{m}$	10.6 $\mu\text{m}$	1.06 $\mu\text{m}$	10.6 $\mu\text{m}$	1.06 $\mu\text{m}$	10.6 $\mu\text{m}$
Al	1.21	34.30	12.5	108.0	0.0067	0.0078
Cu	0.57	12.8	7.32	64.0	0.0115	0.0132
Fe	3.32	7.60	4.65	27.0	0.0181	0.0312
Fe (1536 °C)	3.6	14.8	5.0	15.5	0.0168	0.0544
Ti	3.5	8.24	4.0	19.4	0.0211	0.0435
C (Grafito)	-	2.0 ÷ 3.0	-	1.0 ÷ 2.0	-	0.4 ÷ 0.8

Los cálculos teóricos muestran que la radiación infrarroja (como la de 10.6  $\mu\text{m}$  correspondiente a un láser de  $\text{CO}_2$ ) en un metal no pasa de varios nanómetros ( $10^{-9}$  m) por lo que la deposición de energía tiene lugar fundamentalmente en la superficie del material. Por tanto, al ser la longitud de atenuación despreciable en comparación tanto con las dimensiones de la pieza a procesar como con las longitudes características de difusión térmica (del orden de décimas de milímetro), la intensidad absorbida en la superficie de un medio metálico puede considerarse, dentro de la teoría de la transmisión de calor en un medio sólido, como una fuente de calor superficial a efectos de su modelización en los modelos de cálculo [GARCÍA 1996].

En cualquier caso para conocer el comportamiento de la onda en un medio material no sólo es importante determinar los parámetros de la onda sino también las propiedades ópticas del medio. Así, el índice de refracción en medios no homogéneos varía de un punto a otro y depende de la dirección de propagación en medios no isotrópicos. Las variaciones en el espacio del índice de refracción son causa de deformaciones en el frente de onda, de curvaturas de la trayectoria y de formación de ondas secundarias que se separan de las primarias, como se discute en la doble refracción.

La reflexión de una onda que incide normalmente sobre una superficie plana depende del índice de refracción  $n$  del material y responde a la ecuación 1.27 de Fresnel. La proporción  $R$  de irradiancia reflejada será :

$$R = \left( \frac{n - 1}{n + 1} \right)^2 \quad (1.27)$$

La parte de energía del haz incidente que es absorbida hacia el interior del material depende de la reflectancia y del coeficiente de absorción del material. La reflectancia y el coeficiente de absorción determinan la cantidad de energía del haz que será absorbida dentro del material. La densidad de energía que deposita a la profundidad  $z$ , un haz de energía  $I$ , que incide normalmente sobre un material viene dada por :

$$J(z) = I \cdot (1 - R) \cdot \left[ 1 - e^{-\int_0^z \alpha(z') \cdot dz'} \right] \quad (1.28)$$

donde la integral de la función exponencial se calcula a lo largo del camino óptico seguido por el haz desde la superficie hasta la profundidad  $z$ . Como se indicó en la tabla 1.1, los materiales opacos tienen la longitud de absorción muy pequeña, por lo que, la fracción de energía absorbida es determinada en la práctica por la cantidad  $(1 - R)$  y puede considerarse que se deposita íntegramente en la superficie del material.

### 1.3.3 Mecanismos de la interacción láser-materia

El mecanismo básico de deposición de energía de la radiación láser en un medio material consiste en la absorción de los fotones de la radiación láser incidente por los electrones del medio, los cuales se trasladan a niveles de energía superiores. Estos electrones energéticamente excitados pueden desexcitarse de diferentes maneras.

Si la energía es suficiente el electrón podría abandonar completamente el núcleo o la red. En esto consiste el efecto fotoeléctrico, para el que se necesitan fotones de varios eV. Como la mayoría de los láseres empleados en aplicaciones industriales emiten fotones de mucha menor energía (0.12 eV para el de CO<sub>2</sub> y 1.2 eV para el de Nd-YAG) no tiene lugar este efecto, pero sin embargo, en función de la intensidad de la radiación incidente pueden ocurrir diferentes fenómenos físicos.

Estos fenómenos que ocurren en la zona de interacción dependen tanto de los parámetros de la onda electromagnética como de las propiedades y estado del material [CHUN 1970], [READY 1971]. A nivel cuantitativo, se pueden diferenciar varios casos :

1. Para intensidades bajas (hasta  $10^7 \text{ W m}^{-2}$ ), la intensidad absorbida depende de la longitud de onda, del material y de las condiciones superficiales en la zona de interacción. No hay cambio de fase. Es la situación típica de los procesos de temple. El proceso viene condicionado por la *absortancia* : fracción de energía incidente que es absorbida por el material.
2. Para intensidades mayores (hasta  $10^8 \text{ W m}^{-2}$ ), el material empieza a fundir. A este caso corresponden los procesos de fusión y de soldadura por conducción. la fracción de intensidad absorbida puede estimarse también por la *absortancia*.
3. Si se incrementa la intensidad hasta  $10^9 \text{ W m}^{-2}$ , se forma un canal de absorción de material vaporizado de un tamaño aproximado al del haz láser focalizado rodeado de material fundido. La fracción de energía absorbida por el material se incrementa muchísimo debido a las múltiples reflexiones dentro del canal. En este estado, la relación entre el total absorbido y la intensidad incidente viene dado por un cierto *coeficiente de acoplamiento*. Esta es la situación en el taladrado y en la soldadura de penetración profunda. La influencia de la longitud de onda en la fracción de energía absorbida por el material disminuye.

4. A intensidades todavía mayores, se llega a la ionización del vapor metálico y, en su caso, del gas situado encima del canal de absorción. La cubierta de plasma absorbe una fracción considerable de energía reduciendo la que llega a la pieza y, por lo tanto, reduce la energía absorbida por el material. La longitud de onda recobra su protagonismo ya que la absorción en el plasma es un proceso fuertemente dependiente de ese parámetro.

En los procesos de tratamiento térmico superficial, objeto de este desarrollo, sólo se considerará el primero de los casos anteriores.

### 1.3.4 Propiedades ópticas de los materiales: metales

En 1.2.3 se vió que las ecuaciones de Maxwell determinaban la expresión de la ecuación de onda :

$$\nabla^2 \vec{E} = \frac{\epsilon_r}{c^2} \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} + \frac{\sigma}{\epsilon_0 c^2} \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \quad (1.29)$$

y proporcionan la relación entre el índice de refracción y las propiedades de los medios materiales.

La relación del índice de refracción complejo con la constante dieléctrica  $\epsilon_r$  y la conductividad  $\sigma$  se obtiene sustituyendo en la ecuación de onda (1.29) la expresión de una onda plana para el campo eléctrico. Sustituyendo la expresión de la onda plana para el campo eléctrico (1.17) y el uso de la relación entre la frecuencia angular y la longitud de onda con el índice de refracción complejo, se obtiene la relación

$$\hat{n}^2 = \epsilon + i \frac{\sigma}{\epsilon_0 \omega} \equiv \hat{\epsilon} = \epsilon_1 + i\epsilon_2 \quad (1.30)$$

$\hat{\epsilon}$  se define como la *función dieléctrica compleja*, función que puede ser interpretada como una respuesta generalizada del material. Sus partes real e imaginaria están relacionadas con las del índice de refracción por medio de:

$$\begin{aligned} \epsilon_1 &= n_1^2 - n_2^2 \\ \epsilon_2 &= 2n_1 n_2 \\ n_1^2 &= \frac{|\hat{\epsilon}| + \epsilon_1}{2} \\ n_2^2 &= \frac{|\hat{\epsilon}| - \epsilon_1}{2} \end{aligned} \quad (1.31)$$

La función dieléctrica describe la respuesta del material cuando es sometido a una irradiación electromagnética débil y está condicionada por la estructura microscópica del material. Por este motivo, para estudiar la interacción luz-materia que tiene lugar en el procesamiento de materiales metálicos se deben de considerar las principales características de los metales.

## Metales

En los metales las propiedades ópticas sólo dependen de los electrones que se encuentran en estados de energía próximos al nivel de Fermi, denominados electrones libres.

En el modelo clásico de Lorentz, el electrón se comporta como un oscilador armónico forzado por la fuerza oscilante del campo eléctrico de la onda. Los electrones oscilantes producen una polarización macroscópica del material que se superpone sobre el campo eléctrico de la onda electromagnética que incide sobre el material. La función dieléctrica es la relación del campo eléctrico total (onda más polarización) en relación al campo eléctrico solamente. Una resonancia en la mecánica cuántica corresponde a la transición de un electrón entre dos estados energéticos con una diferencia de energía  $\Delta E$ , que determina una resonancia a la frecuencia  $\omega_0 = \frac{\Delta E}{\hbar}$ . Los tratamientos de la mecánica cuántica y la mecánica clásica llevan a expresiones casi idénticas para la función dieléctrica.

En los materiales metálicos no existen frecuencias de resonancia para los electrones libres y la interacción con la red cristalina se produce mediante colisiones. En los metales de electrones libres la función dieléctrica es de la forma :

$$\varepsilon = 1 + \omega_p^2 \left( -\tau_e^2 + i \frac{\tau_e}{\omega} \right) (1 + \omega^2 \tau_e^2) \quad (1.32)$$

donde  $1/\tau_e$  es el tiempo inverso de colisión y  $\omega_p$  es la frecuencia del plasma, dada por :

$$\omega_p = \sqrt{\frac{N_e e^2}{m_e \varepsilon_0}}$$

A una frecuencia  $\omega = \omega_p$ , que se encuentra en el ultravioleta para la mayoría de los metales,  $\varepsilon_1$  y  $n_1$  son cero.

La frecuencia del plasma divide las propiedades ópticas en dos regiones. Si  $\omega$  es menor que  $\omega_p$  los valores de  $R$  (1.27) y  $\alpha$  (coeficiente de absorción) son elevados, mientras que cuando  $\omega$  es mayor que  $\omega_p$  los valores de  $R$  y  $\alpha$  son pequeños.

Para valores de  $\omega$  menores que  $\omega_p$  las propiedades ópticas de los metales de electrones libres están relacionadas con la conductividad eléctrica  $\sigma_0$ . Esta conductividad está determinada por la expresión de Drude :

$$\sigma_0 = \frac{N_e e^2 \tau_e}{m_e} = \omega_p^2 \varepsilon_0 \tau_e \quad (1.33)$$

Algunas expresiones aproximadas de los parámetros ópticos de los metales resultan de gran interés. En la región del infrarrojo lejano, donde  $\omega \ll 1/\tau_e$ , a partir de la ecuación 1.32 se obtiene que :

$$\varepsilon_1 \simeq \frac{\sigma_0 \tau_e}{\varepsilon_0} \quad ; \quad \varepsilon_2 \simeq \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0 \omega} \simeq n_2 \simeq \left( \frac{\sigma_0}{2 \varepsilon_0 \omega} \right)^{1/2}$$



con lo que a partir de las ecuaciones 1.24 y 1.27 se obtiene :

$$1 - R \simeq \left( \frac{8\varepsilon_0\omega}{\sigma_0} \right)^{1/2} ; \quad \alpha \simeq \left( \frac{2\omega\sigma_0}{\varepsilon_0c^2} \right)^{1/2}$$

En la región del infrarrojo cercano y visible, donde  $1/\tau_e \ll \omega \ll \omega_p$ , con el mismo razonamiento anterior, se obtiene que el índice de refracción está determinado por :

$$n_1 \simeq \frac{\omega_p}{2\omega^2\tau_e} \simeq 0 ; \quad n_1 \simeq \frac{\omega_p}{\omega}$$

de donde se deduce que :

$$1 - R \simeq \frac{2}{\omega_p} \tau_e = \frac{2\varepsilon_0\omega_p}{\sigma_0} ; \quad \alpha \simeq \frac{2\omega_p}{c}$$

En el comportamiento real de los materiales metálicos se producen diversos efectos secundarios que modifican el comportamiento de los electrones libres. Uno de estos efectos secundarios son las transiciones interbanda de los electrones. Algunos metales presentan oscilaciones de los parámetros de acoplamiento muy marcadas por las transiciones interbanda a unas frecuencias determinadas.

El comportamiento de los metales descrito hasta ahora se centra en las propiedades de volumen. Las superficies metálicas suelen presentar valores de reflectancia inferiores a los estimados con el estudio de las propiedades ópticas de volumen. Esto se debe al efecto de fenómenos como la contaminación superficial (por absorbidos y capas de óxido, por ejemplo) o a defectos macroscópicos. Esta es la razón por la que se pueden encontrar publicados valores muy diversos de la reflectancia de los metales. Otros efectos de las superficies que pueden causar desviaciones con respecto al comportamiento en volumen son la aparición de plasmones superficiales y la dispersión difusa de electrones.

### Modificaciones en las propiedades ópticas

En el procesamiento industrial de materiales las densidades de energía del láser empleadas son muy elevadas. Una irradiación láser de gran potencia hace que se alteren considerablemente las propiedades ópticas de los materiales, ya que se perturban los estados de los electrones y átomos de los materiales de forma significativa. La respuesta de los materiales a la luz, estimada con las propiedades ópticas fundamentales no es válida en el caso de irradiaciones de gran potencia. El acoplamiento de la luz con el material no se caracteriza por la función dieléctrica estática, ya que la función se vuelve un proceso dinámico. Por lo tanto la energía absorbida por el material no se corresponde con la que se absorbería si no se modificasen las propiedades ópticas fundamentales.

La radiación láser de gran intensidad produce cambios en las propiedades ópticas de los materiales por tres mecanismos distintos:

1. Al producirse calor se originan cambios en las propiedades del material, como pueden ser la densidad o las características electrónicas. En medios transparentes pueden producirse efectos de autoenfocado térmico y en semiconductores y metales se producen fenómenos como el escape térmico de portadores. Estos cambios en las propiedades del material son los efectos más importantes que tienen lugar cuando se producen irradiaciones muy elevadas.
2. Se pueden generar ópticamente portadores libres por transiciones interbanda, o se puede producir la ionización por impacto en semiconductores y aislantes. Por este motivo los coeficientes de absorción de energía aumentan considerablemente, pudiendo llegar a dañar el material.
3. El campo eléctrico de los haces intensos provoca distorsiones no lineales de los orbitales electrónicos y de las moléculas enteras. Estos campos eléctricos intensos son responsables de fenómenos ópticos no lineales como el autoenfocado y la absorción multifotónica.

En los casos de procesos en los que se produce la fusión o evaporación del material el acoplamiento de la luz con el material puede verse afectada por los cambios que tienen lugar en la forma del material.

Por todos estos motivos, resulta difícil caracterizar con precisión los valores de la reflectancia y de la absorptancia. Las características de la radiación láser se conocen bien, pero no son tan conocidas las características de los materiales en las condiciones en las que tienen lugar los procesos.

### 1.3.5 Factores que influyen en la reflectancia y absorptancia de la superficie del material

Los parámetros de la superficie del material y las condiciones de interacción influyen notablemente en los valores de la reflectancia y de la absorptancia. Los factores más importantes son la longitud de onda, el ángulo de incidencia, la polarización y la intensidad, por parte del haz, y la temperatura, la naturaleza y el estado superficial, por parte del material.

#### Influencia de la longitud de onda de la radiación

El comportamiento de la absorptancia en función de la longitud de onda de la radiación es muy distinto en el caso de los materiales metálicos y los no metálicos. En la figura 1.9, [CAILLIBOTTE 1992], se muestra la variación de la absorptancia de la superficie con la longitud de onda de la radiación para ambos casos.

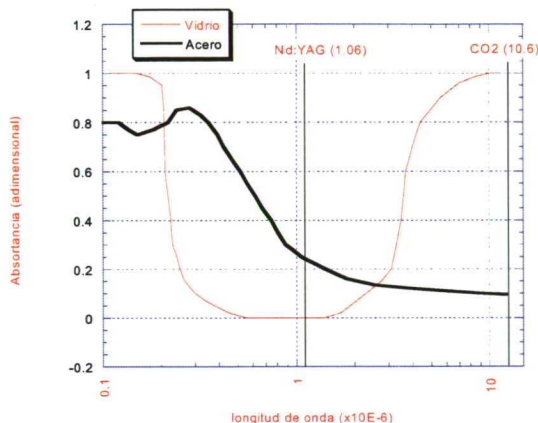


Figura 1.9: Absortancia frente a longitud de onda.

Cuando la longitud de onda es mayor de una micra la absortancia aumenta rápidamente en los no metales, mientras que en los metales metálicos disminuye de forma exponencial. En el caso del láser de CO<sub>2</sub> la longitud de onda es de 10.6  $\mu\text{m}$ , por lo que los materiales metálicos presentan una gran reflectancia. Esta es una de las principales desventajas del láser de CO<sub>2</sub> frente a los láseres de Nd:YAG, que emiten radiación a una longitud de onda de 1.06  $\mu\text{m}$ , para la cual la absortancia de los materiales metálicos es mayor.

### Influencia del ángulo de incidencia y de la polarización del haz

Cuando el ángulo de incidencia de la radiación láser sobre la pieza no es perpendicular a la superficie del material se produce una variación de absortancia. Estas variaciones pueden determinarse para una polarización paralela o normal a la superficie en función del ángulo de incidencia. [PROKHOROV 1990] da las siguientes expresiones :

$$A_p = 1 - \frac{(n_1^2 + n_2^2) \cos^2 \theta - 2n_1 \cos \theta + 1}{(n_1^2 + n_2^2) \cos^2 \theta + 2n_1 \cos \theta + 1} \quad (1.34)$$

$$A_s = 1 - \frac{(n_1^2 + n_2^2) - 2n_1 \cos \theta + \cos^2 \theta}{(n_1^2 + n_2^2) + 2n_1 \cos \theta + \cos^2 \theta} \quad (1.35)$$

En la figura 1.10 [DULEY 1983], se ve que en el caso del hierro puro y para ángulos inferiores a 30°, se puede despreciar la variación de la absortancia. Además, se comprueba la existencia del *ángulo de Brewster*, para el que la componente paralela de la onda incidente posee un máximo de absorción.

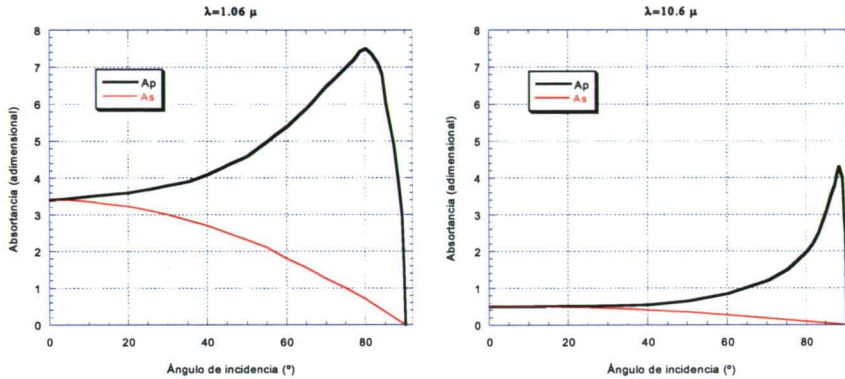


Figura 1.10: Variación de la absorptancia con el ángulo de incidencia y la longitud de onda para el hierro puro a temperatura ambiente.

### Influencia de la intensidad del haz

Cuando las intensidades del haz son bajas la interacción entre el láser y la materia se considera lineal. A altas intensidades se hacen significativos efectos no lineales, como por ejemplo la absorción multifotónica, y la fenomenología de los mecanismos de deposición de la energía del haz láser en el material es más complicada.

En el caso específico de los tratamientos térmicos superficiales la intensidad del haz es sensiblemente menor a la de otros procesos, por lo que no se presentan tantos efectos no lineales y la influencia de la intensidad del haz en la reflectancia y en la absorptancia es menor.

### Influencia de la temperatura de la superficie del material

La determinación teórica de la variación de la absorptancia con la temperatura de la superficie del material es muy difícil porque la determinación experimental de valores de las propiedades de los materiales a altas temperaturas resulta bastante compleja. Hay estudios de varios autores, [RAPPAZ 1991], [RAMOUS 1992], sobre esta variación.

Sin embargo se ha llegado a demostrar teóricamente que la absorptancia aumenta con la temperatura de la superficie del material y esto se ha podido comprobar de forma experimental para los materiales metálicos.

La variación de la absorptancia con la temperatura de la superficie es lineal o prácticamente nula, en la mayoría de los casos, hasta que se alcanza una temperatura



próxima a la de fusión.

### Influencia del estado de la superficie del material

El estado de la superficie del material influye en la absorción y en la reflectancia tanto por la geometría superficial como por la composición química de la superficie. La influencia de la geometría superficial (por existencia de defectos geométricos, rugosidades, etc.) así como la influencia de la composición química en la absorción o reflectancia de la superficie (por presencia de oxidación o la existencia de revestimientos), son objeto de estudios pormenorizados [FABBRO 1987], [GASSER 1987].

La presencia de rugosidades en la superficie del material hace que la absorción de la radiación, en general, se incremente. La existencia de rugosidades está determinada por la calidad del acabado de la superficie del material. La denominada *rugosidad media aritmética*, dada por la ecuación 1.36, proporciona una medida del estado de la superficie.

$$R_a = \frac{1}{L_r} \int_0^{L_r} |z(s)| \cdot ds \quad (1.36)$$

En esta expresión,  $L_r$  es la longitud recorrida en determinada dirección y  $z(s)$  la altura de la superficie respecto a un nivel de referencia medio en dirección perpendicular al desplazamiento  $L_r$ . Por desgracia, este valor no es suficiente para caracterizar totalmente una superficie rugosa ya que en cada dirección puede tener diferente valor y el hecho de tener una medida de rugosidad no garantiza la reproducibilidad experimental de determinado proceso.

La relación entre el efecto de rugosidades y la absorción presenta una gran complejidad para ser determinada teóricamente. En general se considera que la rugosidad aumenta débilmente la absorción de radiación y este efecto es de difícil cuantificación experimental.

La oxidación superficial es una perturbación de origen químico y se manifiesta en los materiales metálicos favorecido por los aumentos de temperatura en su superficie. Su presencia depende del material procesado y de su evolución, y está condicionada en gran medida por la atmósfera que rodea la superficie procesada, que depende del gas de asistencia o protección que se emplea.

La absorción de los materiales metálicos aumenta cuando se forma una capa de óxido en la superficie del material. El principal inconveniente de la formación de una capa de óxido reside en su influencia en las propiedades mecánicas y en el acabado de la pieza. La caracterización de los efectos de la oxidación superficial, tanto teórica como práctica, también presenta una gran complejidad por la escasez de datos ópticos de los óxidos y la complejidad de la evolución temporal y térmica de la capa de óxido.

### 1.3.6 Métodos para modificar la absorptancia superficial

Los valores característicos de la absorptancia de la superficie de materiales metálicos para la longitud de onda de  $10.6 \mu\text{m}$  del láser de  $\text{CO}_2$  pueden estar entre el 5 % y el 15 %, ver tabla 1.2, mientras que para la longitud de onda de  $1.06 \text{ mm}$  del láser de Nd:YAG pueden situarse entre un 25 % y un 35 %.

Tabla 1.2: *Absorptancia de diferentes materiales para la longitud de onda de un láser de  $\text{CO}_2$  en incidencia normal.*

Referencia	Material	T (°C)	Absorptancia
[DULEY 1983]	Fe	25	0.023
	Fe	500	0.053
	Ti	25	0.23
	Zr	25	0.15
	Cu	25	0.015
	Al	25	0.019
	Mo	25	0.05
	Ta	25	0.1
	SS-304	25	0.1
	SS-304	1000	0.14
	Ti-6Al-4V	25	0.13
	Ti-6Al-4V	400	0.14

El procesamiento de materiales con estos valores de absorptancia limitan sensiblemente la intensidad absorbida y requeriría intensidades del haz muy elevadas, por lo que aumenta el coste de los equipos láser utilizados.

Para disminuir la intensidad del haz necesaria, y con ella los requerimientos del equipo láser, se utilizan métodos, [DULEY 1983], [GANAMUTHU 1985] que permiten aumentar la absorptancia de la superficie, con lo que aumenta el rendimiento global de los procesos.

El principal método de aumento de la absorptancia de la superficie consiste en la aplicación de revestimientos absorbentes a la superficie de la pieza a procesar. También es posible aumentar la absorptancia de las superficies mediante la polarización de la radiación, mediante la aplicación de un precalentamiento o mediante el aumento de la rugosidad superficial de la pieza.

#### Uso de revestimientos absorbentes superficiales

En los procesos de tratamiento térmico superficial está muy extendido el uso de revestimientos absorbentes para aumentar la absorptancia de la superficie del material y aumentar así el rendimiento del proceso. El estudio tanto teórico como experimen-

tal del comportamiento de los revestimientos absorbentes es muy complicado y exige simplificaciones que en la realidad no se cumplen,<sup>4</sup> que producen desviaciones entre el comportamiento teórico y el real del revestimiento .

Las características que debe reunir un buen revestimiento absorbente de la radiación láser son las siguientes :

1. En primer lugar ha de caracterizarse por una elevada absorción de la radiación láser. En la tabla 1.3, se muestran datos obtenidos de diferentes fuentes.

Tabla 1.3: *Absortancia de diferentes recubrimientos para la longitud de onda de un láser de CO<sub>2</sub> en incidencia normal.*

Referencia	Recubrimiento	T (°C)	Absortancia
[STERN 1979]	Pintura sobre acero 35 NCD16	25	0.9
	Pintura sobre acero 35 NCD16	$\simeq T_f$	0.7
[PIZZI 1987]	Fosfato Manganeso sobre grafito	Media	0.59±14 %
	Grafito sobre fundición	Media	0.64±4 %
	Óxido de Ti sobre fundición	Media	0.71±4 %
	Fosfato Manganeso sobre AISI 1045	Media	0.89±9 %
	Grafito sobre AISI 1045	Media	0.81±23 %
[GEIGER 1995]	Grafito + TiO <sub>2</sub> sobre St37/SAE 1013	Media	0.72

2. Evidentemente, han de ser estables a temperaturas altas, pues si se deterioran a temperaturas bajas, se pierde progresivamente su propiedad absorbente conforme se incrementa la temperatura.
3. Químicamente deben ser inertes respecto al material a procesar, para que la pieza no sufra daños o ataques superficiales.
4. Al aplicar el revestimiento el espesor debe de ser el adecuado, para evitar que no se aprecie su influencia si es excesivamente delgado o que reduzca el efecto térmico sobre el material si es demasiado grueso. Para que no se reduzca este efecto térmico, el revestimiento debe de presentar además una elevada conductividad del calor.
5. Se ha de aplicar de modo que quede bien adherido a la superficie, para que no se produzcan desprendimientos en las condiciones de proceso, por ejemplo, por la presencia de un flujo de gas de proceso que incide sobre esa superficie.
6. Es conveniente que el revestimiento sea fácil de aplicar y de eliminar después de realizado el proceso, para que no complica ni incrementar demasiado los costes del procedimiento.

<sup>4</sup>Naturaleza del sustrato no homogénea y variaciones de espesor del recubrimiento no evitables.

Existen numerosos tipos de revestimientos absorbentes utilizados en la industria, de muy distinta naturaleza. Existen tanto recubrimientos en pulverizador como recubrimientos por reacción química.

Entre los *recubrimientos en pulverizador* se encuentran pinturas de baja reflectancia normal para la radiación de  $10.6\text{ }\mu\text{m}$  de longitud de onda, que contienen negro de carbón y silicatos de fósforo y manganeso. También se puede emplear pinturas negro mate convencionales. Los espesores de capa que se consiguen aplicando estas pinturas se encuentran entre  $10\text{ }\mu\text{m}$  y  $20\text{ }\mu\text{m}$ .

Los fosfatos de manganeso, cinc o hierro se utilizan como *recubrimientos por reacción química*. Su aplicación se realiza tratando las piezas de aleación de hierro con una solución diluida de ácido fosfórico con otros elementos y los espesores varían entre  $2\text{ }\mu\text{m}$  y  $100\text{ }\mu\text{m}$ .

En los aceros, la utilización de fosfato de manganeso evita que se produzca la oxidación superficial. Pinturas con pigmentos de óxidos absorben bien la radiación del láser. Películas tanto negras como blancas son buenas absorbentes para radiación en el infrarrojo.

### Polarización de la radiación

La absorptancia de la superficie de los materiales es mayor en el caso de que la radiación electromagnética esté polarizada linealmente [RUDLAFF 1990]. El vector campo eléctrico de una onda polarizada tiene una componente paralela y otra perpendicular con respecto al plano de incidencia y estas componentes tienen distintas absorptancias. Para el hierro puro la absorptancia de cada componente viene reflejada en la figura 1.10 de la página 34.

Este fenómeno puede ser utilizado para aumentar la absorptancia de la superficie a la radiación. La polarización del haz se consigue haciendo pasar el láser por sistemas ópticos adecuados. Así un haz láser no polarizado, al incidir con un cierto ángulo sobre un espejo metálico puede dar lugar a un haz reflejado polarizado. El gran inconveniente que presenta la polarización de la radiación es la pérdida de potencia en los sistemas ópticos que se utilizan para polarizar el haz.

### Pre calentamiento

El incremento de la temperatura de la pieza o de su superficie mediante una fuente de calor (como un horno o por pasada previa con el haz láser desenfocado, por ejemplo) puede aumentar la absorción de la radiación láser. El hecho de que la absorptancia aumenta con la temperatura de la superficie se ha comprobado experimentalmente [DULEY 1983], [RAMOUS 1992], [RAPPAZ 1991].



### **Aumento de la rugosidad superficial**

Los defectos geométricos superficiales o las estructuras superficiales periódicas tipo rejilla mejoran la absorción de la radiación láser a bajas temperaturas, por lo que en algunos casos se aplica a la pieza un acabado con chorro de arena o papel de carburo de silicio para originar defectos superficiales.

Con estos tratamientos se pretende aumentar los defectos geométricos superficiales o bien generar estructuras periódicas tipo rejilla, lo que mejora el acoplamiento de la interacción a bajas temperaturas. A temperaturas elevadas el efecto de esta técnica es bastante menor.

## **1.4 Procesos de tratamiento superficial**

Los procesos de tratamiento superficial representan un campo en el cual la aplicación de la tecnología láser se está mostrando competitiva. A continuación se introducen y describen los principales procesos de tratamiento térmico superficial que pueden llevarse a cabo mediante el uso de láseres de potencia.

### **1.4.1 Introducción**

En los tratamientos térmicos se aplica un ciclo térmico a las piezas o herramientas, consistente en un calentamiento hasta una temperatura determinada, seguido de un enfriamiento.

Los tratamientos térmicos se aplican a los materiales metálicos para modificar sus propiedades y características, adecuándolas a las necesidades y requerimientos que soportará el material durante su servicio.

Las propiedades y características de los metales tratados térmicamente dependen de la estructura microscópica del metal que se alcanza una vez finalizado el tratamiento. Dicha estructura microscópica depende de la estructura microscópica inicial y de la temperatura máxima de calentamiento, así como las velocidades de calentamiento y enfriamiento. En este sentido, el tiempo y la temperatura son los factores principales que marcan el tipo de tratamiento térmico que se realiza.

Los tratamientos térmicos superficiales tratan de conseguir una mejora de ciertas propiedades del material en la superficie de este, sin que se produzcan modificaciones en las propiedades del interior del material.

Las propiedades de la superficie del material se alteran mediante la modificación de diversos parámetros, como:

- Composición química de la aleación.

- Homogeneidad del material.
- Estructura cristalina.
- Porcentaje de impurezas.

#### 1.4.2 Clasificación de los procesos de tratamiento térmico

Entre los tratamientos térmicos superficiales se distinguen diversos tipos dependiendo de las transformaciones que tienen lugar durante el ciclo térmico. Los principales tratamientos térmicos se clasifican [APRAIZ 1997] en temple, fusión, revenido, aleado, recubrimiento, y endurecimiento por ondas de choque.

##### Temple

El temple consiste en el calentamiento del material por encima de la temperatura de austenización del acero, para proceder a continuación a un enfriamiento rápido. Durante el calentamiento la ferrita y la perlita en los aceros hipoeutectoides, o la perlita y la cementita en los aceros hipereutectoides, se transforman en austenita. Si el material se enfría entonces a una velocidad suficientemente elevada, la austenita se transforma en martensita, con lo que se obtiene una microestructura de gran dureza.

##### Fusión

En los procesos de fusión se alcanzan temperaturas lo suficientemente elevadas para llegar a fundir el material. Cuando se deja de aplicar energía el material se solidifica, produciéndose un refinamiento del grano, homogeneización de la estructura, disolución de partículas, o una generación de una microestructura de propiedades distintas a la inicial.

##### Revenido

El revenido es una operación final de tratamiento térmico en el que se busca eliminar defectos en la red cristalina, eliminar tensiones internas que han producido otros procesos, etc. En muchos casos el revenido se emplea para aumentar la tenacidad de la zona templada, aun a costa de perder parte de la dureza obtenida en el temple.

##### Aleado

Mediante el aleado se modifica la composición química de la superficie del material mediante su fusión junto con la adición de una película de otro material distinto. Con

ello se logra una aleación en la zona superficial con unas propiedades acordes con las necesidades de la pieza o herramienta.

### **Recubrimiento**

Con el recubrimiento se produce la deposición de una capa de un material sobre el material de base, con la correspondiente modificación de las propiedades de la superficie. La diferencia con el aleado es que en el recubrimiento no se diluye el sustrato en el material base, sino que se forma una capa de material de aporte sobre la superficie base.

### **Endurecimiento por ondas de choque**

El endurecimiento por ondas de choque consiste en la evaporación de una capa delgada de la superficie del material generando impulsos mecánicos que producen ondas de presión en la superficie. Este efecto se logra aplicando una gran energía en un pulso de tiempo de duración muy corto. Se obtiene una gran dureza en una zona superficial del material por la combinación de los efectos térmico y de presión.

#### **1.4.3 Tecnologías de endurecimiento por temple superficial**

Existen diversos métodos que se aplican para realizar procesos de temple superficial de acero y con los que compite la tecnología láser. Estos son el calentamiento por llama oxiacetilénica, por inducción y por haz de electrones.

#### **Calentamiento por llama oxiacetilénica**

Este procedimiento consiste en templar determinadas zonas de las piezas calentándolas mediante la aplicación de una llama oxiacetilénica, para luego enfriarlas rápidamente. Se emplea fundamentalmente con piezas que por su forma o dimensiones no pueden ser endurecidas por otros procedimientos. Las instalaciones de calentamiento por llama oxiacetilénica cuentan con uno o varios sopletes que calientan las partes de las piezas a endurecer, y con varios chorros de agua o depósitos auxiliares que enfrían rápidamente las zonas calientes. También es posible realizar el enfriamiento con corrientes de aire a presión o introduciendo las piezas en un depósito de agua o aceite. Asimismo, es posible realizar el calentamiento con llama de gas de alumbrado, gas natural u otros gases derivados del petróleo, aunque lo más común es realizar el calentamiento con llama oxiacetilénica.

### Calentamiento por corrientes de inducción de alta frecuencia

En el calentamiento por corrientes de inducción de alta frecuencia las piezas se colocan en el interior de una espira o conjunto de espiras, a través de las cuales pasa una corriente eléctrica de alta frecuencia. Con ello se crean campos magnéticos variables en el interior de la pieza, que por corrientes de Foucault principalmente y por histéresis en menor medida, originan un calentamiento de la superficie de la pieza. El calentamiento es muy rápido y se puede localizar en zonas limitadas. La profundidad afectada de la pieza depende de la frecuencia de corriente y del tiempo de exposición de la pieza. Las intensidades de energía están entre  $0.1 \text{ kW cm}^{-2}$  y  $2 \text{ kW cm}^{-2}$ . Los tiempos de proceso son del orden de decenas de segundos y la profundidad tratada puede llegar a los tres milímetros. Este método se emplea para piezas de forma redonda o cilíndrica tratadas en serie. Los dispositivos para el calentamiento y enfriamiento de las piezas son variados y emplean diversos métodos que permiten un movimiento relativo entre las espiras y las piezas adecuado al método de trabajo utilizado.

### Temple superficial por haz de electrones

En el procesamiento de materiales con haz de electrones un filamento espiral incandescente actuando como cátodo produce electrones. Un campo eléctrico acelera los electrones que abandonan el cátodo y los dirige hacia la pieza que se ha de procesar, que actúa como segundo ánodo. La focalización de los electrones se realiza mediante campos magnéticos, chocando con la superficie del metal que se está procesando, y cediendo de esta forma su energía al material. La variación de los campos eléctrico y magnético permite modificar la energía y la concentración de los electrones que forman el haz. En el caso del tratamiento térmico mediante haz de electrones el enfriamiento de la superficie de la pieza tratada se realiza por conducción de calor al interior de la pieza, sin necesidad de un medio de enfriamiento externo, al igual que en el tratamiento térmico superficial con láser.



## Capítulo 2

# Procesos de temple superficial de aceros con láser

### 2.1 Introducción

Un tratamiento superficial que se viene utilizando desde hace siglos para mejorar las características de una superficie mecanizada es el temple superficial. Si un material endurecible (como puede ser el acero o la fundición) se calienta hasta una determinada temperatura donde tiene lugar una transformación de la estructura original a austenita y posteriormente se enfría rápidamente, la austenita se transforma en martensita (microestructura de mayor dureza que la original), aumentando de forma notable las propiedades de la pieza en cuanto a resistencia al desgaste y fatiga. Se tiene conocimiento de que este proceso ya era empleado de forma primitiva entre los años 1000 a. de C. y 500 a. de C., cuando en Oriente Medio se comenzaba a fabricar el hierro con cierta regularidad. Se tiene constancia [MORÍS 2001] de que los chinos en el siglo IV a. de C. ya utilizaban técnicas siderúrgicas muy superiores a las de Occidente y dominaban el tratamiento de temple, lo que les permitía que sus herramientas tuviesen una vida más larga.

El endurecimiento superficial se puede lograr por diferentes métodos convencionales ya comentados en la página 41.<sup>1</sup> En el endurecimiento superficial mediante láser (ver figura 2.1) el material se desplaza por debajo del láser calentándose hasta la temperatura de formación de la austenita. Cuando el haz deja de incidir en un determinado punto de la superficie, el calor fluye por conducción, desde la superficie hacia el resto del material, mientras que en los métodos clásicos por llama o inducción, el enfriamiento se logra por métodos externos de enfriamiento (sumergiendo la pieza tratada en agua o en aceite).

---

<sup>1</sup> Llama oxiacetilénica, inducción alta frecuencia, haz de electrones

Una característica del endurecimiento por láser es la rápida elevación de la temperatura, favorecida por la alta densidad de energía del haz láser. Así, la temperatura de austenización se alcanza en fracciones de segundo. El tiempo de interacción debe ser corto para evitar llegar a la fusión que inutilizaría la pieza tratada. Por todo esto, la cantidad total de energía aportada a la superficie es pequeña y puede ser evacuada rápidamente de la superficie por conducción de calor a través del propio material.

Con esto se consigue [POPMA 1992] una velocidad de enfriamiento muy elevada (típicamente del orden de  $\pm 10^4$  K/s), que tiene ventajas frente a los tratamientos convencionales: se logra una estructura martensítica mas fina y se puede lograr endurecer aceros de bajo contenido en carbono (0,1 % al 0,2 %, en peso) gracias a que se supera la velocidad de enfriamiento que es mas crítica en estos aceros.

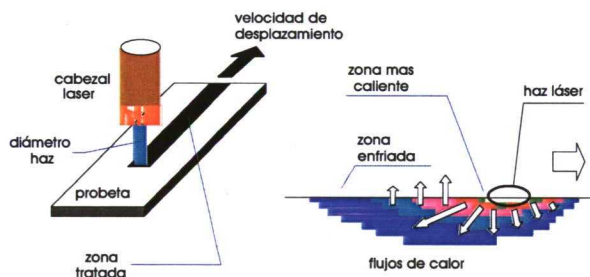


Figura 2.1: *Proceso de tratamiento de endurecimiento por láser.*

Además, el endurecimiento por láser ofrece las ventajas adicionales de que permite controlar fácilmente la forma y cantidad de fuente de energía, el tratamiento es muy localizable, el aporte de energía es pequeño, minimiza la zona afectada térmicamente y produce baja distorsión de la pieza. De este modo se pueden endurecer superficies de geometría compleja tales como ejes cilíndricos, árboles de levas y cigüeñales. En la industria del automóvil ya se tratan muchos de estos componentes mediante láser.

Las consideraciones metalúrgicas sobre la templabilidad de determinado tipo de acero no se diferencia mucho del análisis necesario para un tratamiento convencional. Sin embargo, el ciclo térmico en el endurecimiento por láser es diferente: la velocidad de calentamiento es mucho mayor, el tiempo de calentamiento es más corto y la velocidad de enfriamiento mayor. Esto afecta a las condiciones del tratamiento tales como el valor a considerar de la temperatura de austenización [BERGMANN 1993]. En este capítulo se estudian los factores y condiciones que influyen en el temple del acero y se revisan las características particulares del procedimiento de temple superficial con láser.

## 2.2 Metalurgia del acero

La estructura y la química de los materiales metálicos que se tratan térmicamente es de gran importancia, pues determinan el comportamiento del material frente al calentamiento y las posibilidades de variación de las propiedades metálicas de la pieza a procesar. El estudio de los aspectos metalúrgicos de las aleaciones de hierro y los procesos que tienen lugar durante el temple son de especial interés debido a la importancia del endurecimiento superficial del acero frente a otros tratamientos térmicos.

### 2.2.1 Metales y aleaciones férreas

En el sistema periódico los elementos de transición son los metales. Éstos se caracterizan por una subcapa  $d$  ó  $f$  incompleta, orbital cuya función de onda es pequeña. Por este motivo los metales son duros, su densidad es elevada y su temperatura de fusión es alta.

Industrialmente se utilizan metales compuestos por numerosos cristales de tamaño pequeño, entre  $10^{-3}$  mm y  $10^{-1}$  mm, y la orientación cristalina varía de un grano a otro. El enlace metálico es el responsable de la cohesión de los átomos, que comparten electrones. Con este tipo de enlace existe una estructura de bandas de energía por la que los electrones de conducción tienen una gran movilidad. Como en el enlace metálico no existe direccionamiento, los metales tienen una elevada plasticidad por la cristalización en sistemas con múltiples posibilidades de deslizamiento. Los metales tienen además unas conductividades térmica y eléctrica elevadas, por la movilidad de sus electrones. Su reflectancia también es elevada.

La red cristalina de los metales suele ser cúbica centrada en las caras (c.c.c.), cúbica centrada en el cuerpo (c.c.) ó hexagonal compacta (h.c.). Existen metales como el hierro que pueden presentar diferentes estructuras cristalinas a distintas temperaturas, por lo que se dice que presentan variedades alotrópicas. En el caso del hierro puro existen dos transformaciones alotrópicas.

Dos o más elementos metálicos forman una aleación cuando tras la solidificación de una fase líquida homogénea se forma un sólido con propiedades distintas a las de los elementos que la forman. El acero es una aleación de hierro y carbono. En la Figura 2.2 se muestra el diagrama de equilibrio del acero.

La aleación de hierro-carbono en estado sólido suele estar en fase de ferrita, de austenita, de cementita o de grafito.

La ferrita está constituida por hierro  $\alpha$  ó  $\gamma^2$  y trazas de carbono. El porcentaje de carbono se encuentra entre el 0.02 % en la ferrita  $\alpha$  a baja temperatura y el 0.1 % en

---

<sup>2</sup> Hierro  $\alpha$  : cúbica centrada en el cuerpo (c.c.), hierro  $\gamma$  : cúbica centrada en las caras (c.c.c.).

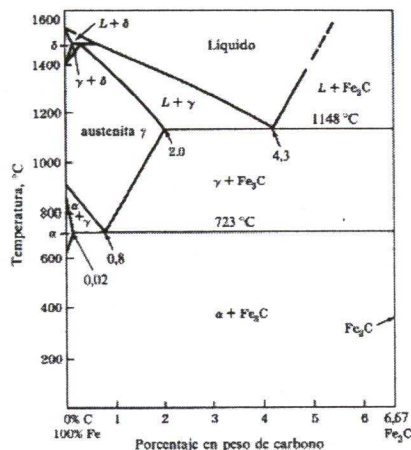


Figura 2.2: Diagrama de equilibrio hierro-carbono [AVNER 1988].

la ferrita  $\gamma$ , a temperaturas elevadas. La ferrita se caracteriza por su baja dureza y es muy dúctil y maleable.

La austenita es una solución sólida de carbono en hierro  $\gamma$ , con una red cristalina cúbica centrada en las caras. La solubilidad del carbono se sitúa en torno al 2 %. Suele presentarse a temperaturas elevadas, aunque también se puede encontrar en los aceros de alta aleación a temperatura ambiente. Es una fase blanda, muy dúctil y tenaz.

La fase cementita es el carburo de hierro, en el que el porcentaje de carbono es  $w_C = 6.67 \%$ .<sup>3</sup> Presenta una tendencia a descomponerse en forma de grafito. Se caracteriza por una elevada dureza y es muy frágil.

Finalmente, el grafito es carbono cristalizado en forma hexagonal estratificado.

Las transformaciones que tienen lugar durante el enfriamiento de un acero hipoeutectoide que se encuentra a elevada temperatura con una estructura austenítica son de gran interés.

Cuando la aleación con una estructura austenítica se enfría a una temperatura  $A_{r3}$ , aproximadamente sobre los 775 °C, la austenita comienza a transformarse en ferrita paramagnética. Cuando se alcanza la temperatura  $A_{r2}$  de 768 °C la ferrita paramagnética se transforma en ferrita ferromagnética. Si se continúa enfriando la aleación hasta una temperatura  $A_{r1}$ , que se encuentra en torno a los 723 °C, comienza a aparecer la perlita, en una transformación que tiene lugar a temperatura constante. En esta transformación la ferrita nuclea y crece progresivamente en los límites de grano

<sup>3</sup>  $w_C$  representa la fracción másica: masa de carbono respecto de la masa total.



austeníticos.

Los valores de las temperaturas  $Ar_3$  y  $Ar_1$  dependen de la velocidad de enfriamiento de la aleación. Para conocer las temperaturas a las que tendrán lugar las reacciones y los productos de dichas reacciones en función del tiempo transcurrido, se recurre a los diagramas de transformación. Como durante la formación de martensita a partir de la ferrita, perlita o martensita revenida, disminuye el volumen de la probeta calentada, existe una relación entre la presencia de las diferentes fases en el metal, con el tamaño de grano y la dilatación de la muestra. Hay cuatro tipos de diagramas que se suelen separar en dos grupos.

Un primer grupo está constituido por los diagramas de transformaciones isotérmicas, que muestran lo que le pasa a un acero cuando mantiene su temperatura constante durante un largo periodo de tiempo. Se distinguen dos tipos:

- diagramas IT (Isothermal Transformation). Nos indican en que momento comienza o finaliza la formación de la austenita, siendo muy útiles en tratamientos térmicos rápidos, como es el caso del endurecimiento por láser.
- Diagramas TTT (Time Temperature Transformation). En estos se parte de una temperatura de valor superior a  $Ar_3$  enfriando el acero hasta un valor determinado. Sobre un sistema de referencia temperatura-tiempo se dibujan las curvas de fracción isovolúmica transformada a partir de la austenita (curvas en C o de nariz). Las dos curvas limitan por un lado, la transformación de austenita en perlita (a alta temperatura) y la transformación de austenita en bainita (a baja temperatura). En estas curvas se aprecia que si el enfriamiento es suficientemente rápido no se llegará a la línea que marca el comienzo de la formación de la perlita, sino que se alcanzará la línea  $M_s$ , que marca el comienzo de la transformación en martensita.

En la Figura 2.3 se muestran las curvas *TTT* para un acero hipoeutectoide ( $w_C < 0.8\%$ ).

El segundo grupo lo constituyen los diagramas de calentamiento y enfriamiento continuos. En los casos reales de tratamientos térmicos casi nunca se mantiene la temperatura constante. Por eso una alternativa a los diagramas de transformación isoterma consiste en calentar o enfriar continuamente la muestra bajo estudio y medir la dilatación en función de la temperatura, generando dos tipos de diagramas:

- CHT (Continuous Heating Transformation). Diagramas de transformación de calentamiento continuo. Como el de la figura 2.4.
- CCT (Continuous Cooling Transformation). Diagramas de transformación de enfriamiento continuo.

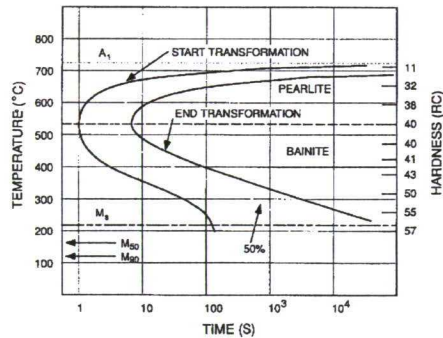


Figura 2.3: Diagrama TTT para un acero AISI 1050 [MIGLIORE 1996].

Estos diagramas son muy sensibles a la composición exacta de la aleación, por lo que al escoger uno determinado se debe tener muy en cuenta que si la composición de la aleación bajo estudio no coincide exactamente con lo encontrado en los manuales, la respuesta real puede ser muy diferente.

El estudio de las curvas *TTT* y *CCT* permite conocer la mínima velocidad de enfriamiento que se necesitará para que se produzca la transformación martensítica. Esta velocidad se conoce como velocidad crítica de temple.

Las curvas *TTT* y *CTT* analizan la cinética de las transformaciones metalúrgicas que tienen lugar cuando la aleación se está enfriando. Éstas curvas dependen de la temperatura a partir de la cual comienza el enfriamiento y del tamaño de grano inicial.

En ocasiones se utilizan diversos elementos aleantes para modificar las propiedades del acero (para aumentar su resistencia a la corrosión, abrasión, etc.) pero la máxima dureza alcanzable (asociada a la microestructura martensítica), depende [MIGLIORE 1996] en primer lugar de su contenido en carbono (ver Figura 2.5). El efecto que los componentes de la aleación tienen sobre la *templabilidad* (entendida como susceptibilidad de endurecerse debido a la rapidez de enfriamiento adecuada) de los aceros se resumen [CARRASQUILLA 1992] en:

- Elementos como N, Ni, Mn, Cu y Zn rebajan la solubilidad del C de la austenita en equilibrio con la ferrita, desplazando hacia abajo la línea  $A_{r1}$  y la concentración de C por debajo del 0.8 %. Esto hace disminuir la velocidad crítica de temple permitiendo alcanzar profundidades de temple mayores que en aceros no aleados.
- Otros elementos como Cr, W, Mo, Si, V, Al, P y Ti desplazan hacia arriba la línea

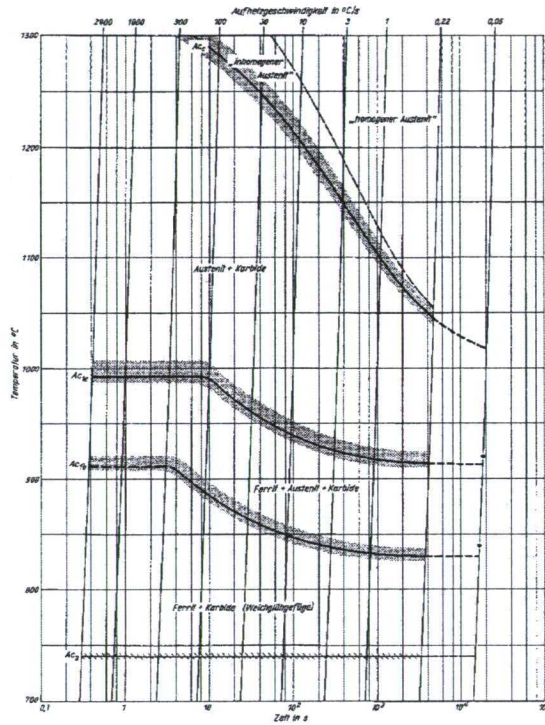


Figura 2.4: Diagrama CHT para acero X38CrMoV 5 1 [ASM 1991].

$Ar_1$  y aumentando la concentración de carbono en la eutectoide. Si los contenidos de alguno de estos elementos son lo suficientemente elevados se pueden obtener aceros exclusivamente ferríticos que no sufrirán, por tanto, transformaciones en su calentamiento o enfriamiento.

En la Figura 2.6 se puede apreciar el efecto de los aleantes sobre las curvas TTT. Ambas curvas son para un acero con un contenido del 0.60 % de carbono y un contenido de manganeso diferente: del 0.91 % las de la izquierda (A) y del 1.32 % las de la derecha (B). Otras causas que modifican la velocidad crítica de temple es el tamaño de grano. Así, para los aceros de grano grueso las velocidades críticas son inferiores a las correspondientes de aceros de grano fino.

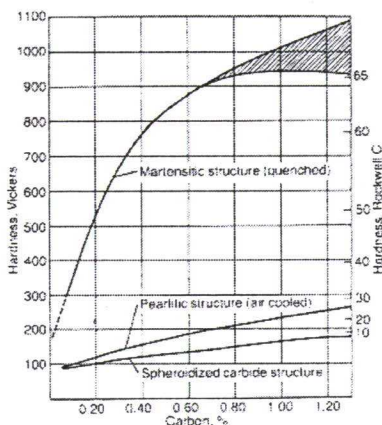


Figura 2.5: Dureza obtenible en función del contenido de Carbono [KRAUSS 1995].

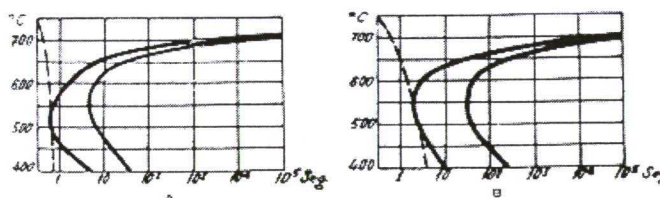


Figura 2.6: Efecto de los aleantes en los diagramas TTT: (A) 0.91 % Mn ; (B) 1.32 % Mn [CARRASQUILLA 1992].

### 2.2.2 Otros metales de interés

Los metales férreos son los más empleados en la industria y por lo tanto su importancia en el estudio de los tratamientos térmicos superficiales es mayor que la de otros metales. Sin embargo hay que mencionar que existen tratamientos térmicos superficiales distintos del temple del acero que mejoran las propiedades superficiales de diversos metales, y que son susceptibles de ser realizados con láser de potencia. Los principales metales no férreos que pueden ser tratados con láser son las aleaciones de aluminio, cobre, titanio y níquel.

El níquel es un ejemplo de material metálico no férreo cuyo tratamiento térmico superficial presenta interés. El níquel se caracteriza por una estructura cristalina cúbica centrada en las caras. Se trata de un material dúctil y muy resistente a la



corrosión. Es ampliamente utilizado en la industria química y en la de alimentación, como elemento base, como componente de una aleación o como recubrimiento de otro material.

El proceso de tratamiento superficial de níquel es el vitrificado láser o *laserglaze*. Consiste en procesar el material con una intensidad elevada durante un intervalo de tiempo muy pequeño. La estructura se modifica y se mejoran las propiedades mecánicas en la superficie tratada.

### 2.3 Temple del acero

El temple consiste en el calentamiento del acero o del hierro a una temperatura superior a la crítica, el mantenimiento del material a esa temperatura un tiempo de permanencia suficiente para conseguir el estado austenítico y el posterior enfriamiento del material. En el temple el enfriamiento del material se debe realizar muy rápidamente, por lo que en algunos procedimientos se emplean medios como agua o aceite para llevar a cabo dicho enfriamiento.

Existe un gran número de aleaciones que se pueden endurecer por precipitación, las cuales presentan una dureza baja después del enfriamiento rápido, pero cuya dureza aumenta cuando comienza la precipitación. Sin embargo, en el caso de los aceros el material se endurece por enfriamiento rápido, y en los casos en los que se produce precipitación la dureza disminuye. La existencia de esta diferencia se debe a la transformación alotrópica que tiene lugar en el acero y que origina la formación de una estructura conocida como martensita.

Cuando el acero presenta una estructura de austenita y se realiza un enfriamiento lo suficientemente rápido como para pasar la “curva de Bain” o “codo de Bain” en el diagrama *TTT*, se produce la transformación alotrópica que origina la formación de la nueva estructura de martensita, particularmente dura. A nivel industrial se utiliza ampliamente esta transformación de endurecimiento para dotar a las piezas de acero de unas mejores características de desgaste, resistencia a la erosión y durabilidad. La estructura de austenita se presenta en el acero cuando se encuentra a temperaturas que en un diagrama hierro-carbono están por encima de la línea  $A_3$  para una aleación determinada, donde la austenita es una fase estable.

En los procesos de temple se pueden diferenciar tres periodos fundamentales: 1º.- calentamiento; 2º.- permanencia a temperatura; 3º.- enfriamiento. Las fases de calentamiento y permanencia a temperatura son similares a las de otros tratamientos tales como el recocido de regeneración o el normalizado, debido a que las variantes que pueden existir son pequeñas. La principal diferencia entre el temple y otros tratamientos se encuentra, por lo tanto, en la fase de enfriamiento.

En los apartados siguientes se estudian las diferentes fases del temple, analizando la problemática particular de cada una y haciendo especial hincapié en los procesos de temple con láser.

### 2.3.1 Descripción del ciclo térmico

#### Calentamiento para el temple

Cuando durante el calentamiento del acero se llega a la temperatura crítica inferior, aproximadamente sobre los 723 °C, la perlita que contiene el acero y cuyo porcentaje depende de la composición, comienza a transformarse en austenita. Esta transformación consiste en el cambio de la estructura cristalina del hierro de la perlita, que pasa de hierro  $\alpha$  a hierro  $\gamma$ . Mientras se desarrolla esta transformación, el acero, que hasta entonces se estaba dilatando durante el calentamiento, se contrae, para continuar luego la dilatación.

Si el calentamiento se detiene entre  $Ac_1$  y  $Ac_3$  no todo el material se habrá transformado en austenita, independientemente del tiempo en el que el material que se está tratando sea mantenido a esa temperatura. Tal como se puede ver en un diagrama Fe-C, entre las temperaturas  $Ac_1$  y  $Ac_3$ , coexisten dos fases que se mantienen en equilibrio, y la proporción de esas dos fases depende de la temperatura a la que se encuentre el acero. En el caso de un acero al carbono con un contenido de un 0.4 % de C, la temperatura  $Ac_1$  es de 723 °C y la temperatura  $Ac_3$  es de 800 °C.

Al producirse esta recrystalización en el material, los nuevos cristales de austenita que aparecen al principio tienen el mínimo tamaño que pueden presentar para una composición del acero determinada.

Una vez que en el acero se ha alcanzado la temperatura crítica superior  $Ac_3$ , si el acero se mantiene por encima de este nivel de temperatura los cristales de austenita tienden a desarrollarse, aumentando su tamaño. Cuanto más alta sea la temperatura a la que se mantiene el acero y más tiempo dure el calentamiento, más aumentarán de tamaño los cristales. Esto dará lugar a cristales gruesos de austenita. Dado que la estructura de los cristales de acero tras el tratamiento depende del tamaño que tienen los cristales de austenita antes del enfriamiento, después de un tratamiento a elevada temperatura se obtendrá una estructura gruesa y un acero cuyas características serán inferiores a las de un acero enfriado a partir de cristales de austenita de tamaño fino.

#### Permanencia a determinada temperatura en el temple

Para conseguir que toda la masa de acero que se desea temprar esté formada por cristales de austenita, es necesario que el acero permanezca a elevada temperatura un tiempo determinado.

La duración del calentamiento en los procesos de temple depende de diversos factores, como la masa de la pieza, la temperatura, la velocidad de calentamiento, la clase de acero a tratar, o los estados inicial y final del material.

Cuando la zona del material que se desea endurecer alcanza la temperatura de tratamiento comienza el tiempo de mantenimiento del acero a temperatura. Cuando el acero supera la temperatura crítica superior  $Ac_3$  todo el carbono se encuentra en solución con la austenita, a pesar de lo cual el contenido en carbono puede ser distinto en diversas regiones de austenita. Esto sucede en los aceros hipoeutectoides porque hay zonas que en principio estaban formadas por ferrita y que al ser austenizadas en los primeros momentos presentan un bajo contenido en carbono y en los aceros hipereutectoides porque existen zonas que en principio estaban formadas por carburos y luego, cuando alcanzan altas temperaturas, tienen en un principio un elevado contenido de carbono. En los aceros hipoeutectoides conviene que transcurra algún tiempo para que el carbono se difunda en las zonas que anteriormente fueron ferríticas. Manteniendo el material a temperaturas elevadas, el porcentaje de carbono tiende a equilibrarse en toda la masa. Sin embargo esta tendencia a equilibrarse puede verse afectada y retrasarse por diversos factores: segregaciones no metálicas que tienden a formar barreras entre los granos, presencia de fósforo y oxígeno que se encuentran en solución y repelen el carbono, existencia de elementos aleados como cromo o wolframio que pueden formar carburos complejos, etc.

La difusión del carbono es considerablemente mayor a temperaturas elevadas, por lo que cuanto más alta sea la temperatura que se alcanza, menor será el tiempo necesario para homogeneizar la microestructura. Es posible reducir el tiempo de calentamiento realizando el tratamiento a temperaturas muy por encima de la temperatura crítica superior  $Ac_3$ . El problema de los tratamientos con calentamientos a temperaturas muy elevadas es que se produce un excesivo crecimiento de los cristales, por lo que generalmente se tiende a prolongar ligeramente la duración del proceso y efectuarlo a temperaturas no excesivamente elevadas.

El problema que se presenta en el tratamiento de temple superficial con láser de un gran número de aceros, tales como el acero SAE 1045, es precisamente que a elevadas temperaturas la formación de austenita, así como la redistribución de carbono, necesaria para formar la solución sólida de hierro y carbono, necesita un tiempo pequeño, pero finito. El procedimiento de endurecimiento con láser se realiza barriendo la superficie del metal con el haz, de tal forma que la velocidad con la que se expone la superficie está relacionada con los tiempos convenientes para que, según el acero que se está procesando, se forme la austenita y se produzca una redistribución de carbono adecuada.

Entre el endurecimiento tradicional con procedimientos convencionales (en los que



se produce un endurecimiento en volumen) y el endurecimiento superficial, no hay diferencias fundamentales, ya que las reacciones metalúrgicas que tienen lugar son las mismas. La diferencia más notable reside en el hecho de que en el endurecimiento por temple superficial el tiempo del ciclo de calentamiento se realiza en un intervalo de tiempo considerablemente más corto que en el endurecimiento tradicional. Cuando el endurecimiento se realiza con láser, el tiempo en el que se realiza el ciclo de calentamiento es especialmente corto, pues el calentamiento hasta las temperaturas a las que se produce la austenización se desarrolla en tiempos del orden de un segundo o de fracciones de segundo, con lo que el periodo de calentamiento es inferior que el periodo de enfriamiento.

El comportamiento de los materiales féreos durante el enfriamiento desde la región de austenita ha sido profundamente estudiado durante muchos años para diversas velocidades y condiciones de enfriamiento. Sin embargo el periodo de calentamiento no ha sido estudiado con tanta profundidad y existe cierto desconocimiento de la dinámica de algunos procesos. Esto se debe a que en los procedimientos de tratamiento térmico clásicos el calentamiento no era una fase crítica debido a las velocidades relativamente lentas con las que se desarrollaba, pero sí lo era el enfriamiento pues en función del tratamiento que se deseaba dar al material en ocasiones debía de ser realizado a elevada velocidad.

El problema que se presenta cuando se realizan calentamientos muy rápidos, como los que se emplean en el endurecimiento con láser, es que la cinética de la formación de austenita y de la redistribución del carbono a velocidades de calentamiento muy altas es muy compleja y no se conoce con total exactitud. Se ha llegado a estudiar la modelización de la formación de austenita mediante técnicas estadísticas y de redes neuronales, pero existe cierto desconocimiento de la física fundamental de estos procesos.

### Temple de los aceros hipoeutectoides

En el caso de que el acero que se está templando tenga un contenido en carbono inferior al 0.90 %, en el momento en el que se inicia el enfriamiento todo el material que se desea endurecer tiene que encontrarse formando cristales de austenita. En caso contrario el temple no será perfecto y la dureza que se alcanzaría con el tratamiento sería inferior a la máxima obtenible para ese acero. Esto se debe a que cuando en los aceros de contenido en carbono inferior al eutectoide no se alcanza una temperatura superior a la  $A_{c3}$  no toda la ferrita se disuelve en la austenita. Una vez finalizado el proceso de temple la ferrita que no se pudo disolver en la austenita se encuentra en el acero templado. Puesto que la dureza de la ferrita es muy inferior a la de la martensita, el



acero obtenido será blando. La única forma factible de lograr una estructura martensítica perfecta y por lo tanto la máxima dureza para un acero hipoeutectoide, consiste en realizar el calentamiento de tal forma que antes de iniciarse el enfriamiento toda la estructura del acero sea austenítica, para que pueda transformarse en martensita sin que queden partes de ferrita.

El proceso de endurecimiento de los aceros hipoeutectoides es altamente dependiente del contenido en carbono del metal, pues la dureza de la martensita depende de su contenido en carbono. En la figura 2.7 se muestra la dureza para distintos porcentajes obtenidos de martensita en función del contenido en carbono.

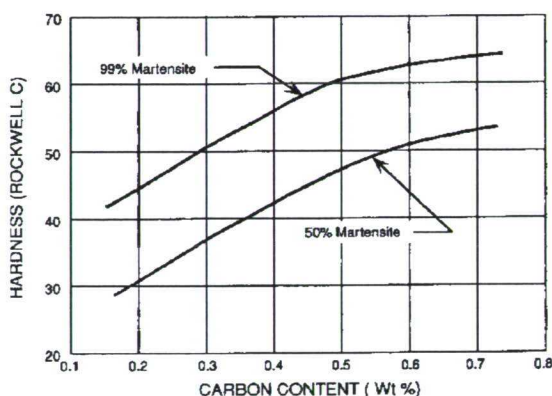


Figura 2.7: Variación de la dureza del acero en función del contenido en martensita [MIGLIORE 1996].

El temple de los aceros hipoeutectoides se suele realizar en los procedimientos convencionales de forma que se alcance una temperatura entre  $40^{\circ}\text{C}$  y  $50^{\circ}\text{C}$  por encima de la temperatura crítica superior. En el procedimiento de temple con láser el incremento de temperatura por encima de la temperatura crítica superior es mayor todavía, por los motivos expuestos en la página 52. Cuando el orden de magnitud de la velocidad de calentamiento se encuentra en torno a los  $1000^{\circ}\text{C s}^{-1}$ , el acero se debe de calentar del orden de  $120^{\circ}\text{C}$  por encima de la temperatura crítica superior para garantizar el estado de austenización completa.

### Temple de los aceros hipereutectoides

En los aceros hipereutectoides, entre los que destaca el grupo de aceros de herramientas, es posible llevar a cabo el temple sin que sea necesario realizar un calentamiento

de austenización completa.

La experiencia ha mostrado que para el temple de aceros hipereutectoides la máxima dureza se obtiene cuando se realiza un calentamiento de austenización incompleta. En este caso, cuando el calentamiento ha alcanzado la máxima temperatura, en el acero existen tanto austenita como una cantidad determinada de cementita, además de carburos aleados y complejos sin disolver, en una cantidad que depende de la temperatura alcanzada y de la composición del acero. La austenita que se encuentra junto a los carburos tiende a tener un porcentaje de carbono superior al de las zonas de austenita separadas de los carburos. Una vez finalizado el proceso, tras el enfriamiento se obtiene martensita a partir de la transformación de la austenita y carburos, pudiendo quedar en ocasiones parte de austenita sin transformar.

### Enfriamiento en los procesos de temple

En principio, el acero que se desea endurecer debe de estar en forma de austenita antes de que comience la fase de enfriamiento. Si a partir de estas condiciones el acero es enfriado con la suficiente rapidez, el material pasa a presentar una estructura martensítica de gran dureza. La transformación de la austenita comienza a una temperatura que se denomina  $M_S$ , que se encuentra generalmente por debajo de los 350 °C.

En el caso de que el enfriamiento del acero desde una temperatura superior a la crítica sea lento, la austenita se transforma en otros constituyentes a una temperatura  $Ar_1$ , inferior a la teórica (721 °C), pero muy próxima a esta. Los constituyentes que se presentan en este caso, normalmente con una estructura perlítica, poseen una dureza muy inferior a la de la martensita, por lo que el acero al final del tratamiento será muy blando.

Aumentando progresivamente la velocidad de enfriamiento, la temperatura  $Ar_1$  a la que tiene lugar la transformación de la austenita es cada vez más baja. También es posible observar que al aumentar la velocidad de enfriamiento la estructura microscópica que se obtiene va cambiando progresivamente.

La estructura que se presenta cuando el enfriamiento es muy lento es *perlita gruesa*. A partir de una velocidad de enfriamiento determinada se obtiene *perlita laminar fina* y cuando la velocidad de enfriamiento es algo mayor se forma un constituyente oscuro y difuso que se denomina *sorbita*. Si se continúa aumentando la velocidad de enfriamiento se presenta la *troostita*, que es un constituyente duro, muy oscuro y que forma rosetas de aspecto nodular.

Al ir variando la estructura que se obtiene según se ha indicado, aumenta la dureza final que presenta el acero. Se pasa de durezas de entre 10  $R_C$  y 20  $R_C$  que presenta el acero con estructura perlítica, a durezas de entre 30  $R_C$  y 45  $R_C$  para aceros

compuestos de troostita.

Si el enfriamiento se realiza tan rápidamente que por su efecto la temperatura de transformación de la austenita  $Ar_1$  desciende hasta entre 650 °C y 600 °C, se puede observar la existencia de otra transformación a una temperatura entre 0 °C y 350 °C, mucho más baja que en los casos anteriores, que se denomina  $Ar_3$ . Con esta transformación se produce un gran aumento de la dureza, de entre 40  $R_C$  y 67  $R_C$ , y aparece la estructura martensítica.

Para lograr una estructura totalmente martensítica en el temple de los aceros toda la austenita se debe de transformar a baja temperatura, por debajo de los 350 °C. Esto sucede cuando no se produce ninguna de las transformaciones posibles por encima de  $Ar_3$ .

La velocidad crítica de temple es aquella que hace que toda la transformación de la austenita tenga lugar a la temperatura  $Ar_3$ . Es la mínima velocidad enfriamiento que permite alcanzar una estructura totalmente martensítica y por lo tanto un temple teóricamente perfecto con una gran dureza.

### 2.3.2 Endurecimiento por temple superficial con láser y dureza de la superficie templada

Tanto el hecho de que se requieran temperaturas elevadas para el endurecimiento con láser, como que se requiera un tiempo suficiente por encima de la temperatura  $Ac_3$  para que se homogeneice la austenita formada, hacen que los picos de temperatura durante el procesamiento con láser deban de ser altos. En estas circunstancias se ha observado que se tiende a formar una capa superficial de entre 5  $\mu m$  y 20  $\mu m$  de espesor (cuya estructura no se ha podido categorizar todavía) y que algunos investigadores señalan como zona de descarburización superficial. Dicha capa presenta una dureza ligeramente inferior a la del resto de la zona templada. En los materiales endurecidos con láser también se ha podido encontrar austenita retenida, aunque no se ha llegado a estudiar como se ve afectada la austenita retenida por los parámetros del láser.

En cualquier caso, hay que tener en cuenta los siguientes condicionantes para llevar a cabo un procedimiento de endurecimiento superficial con láser:

- *Temperatura máxima en la superficie.* El límite superior de la transformación de estado sólido, o máxima temperatura a la que se puede templar el material, se encuentra determinado por el punto de fusión del material, ya que la posible fusión del material podría echar a perder la pieza que se está tratando.
- *Geometría de la pieza.* Cuando se procesa una pieza con una superficie plana de geometría uniforme es factible seleccionar unos parámetros de procesamiento que



permitan acercarse a la temperatura de fusión del material sin que esta se llegue a alcanzar en ningún momento. Sin embargo, cuando se van a procesar superficies irregulares de piezas con formas complejas, puede suceder que la pieza presente diferentes disipaciones de calor en diversas zonas que deben de ser tratadas, por lo que resulta imposible seleccionar previamente unos parámetros de proceso que permitan mantener una temperatura constante en toda la zona a tratar.

- *Tratamiento de grandes superficies.* Otro inconveniente del temple superficial con láser se encuentra en que la densidad de energía necesaria para lograr la temperatura de temple implica un diámetro del haz láser limitado y para cubrir una determinada superficie se hace irremediable la necesidad de solapar diferentes pasadas del haz. En cada barrido del haz se produce un flujo de calor lateral que afecta al material tratado en pasadas anteriores, produciendo un recocido parcial de la zona endurecida en la pasada anterior [DAMBORENEA 2001]. Para atenuar este efecto perjudicial es necesario seleccionar la óptica adecuada o la forma de realizar el procesamiento, seleccionando los parámetros adecuados. En este sentido, el efecto del flujo lateral del calor es tanto mayor cuanto menor es la velocidad de procesamiento, por lo que se pueden seleccionar una densidad de potencia y una velocidad de pasada elevadas para evitar el recocido de zonas adyacentes a la que se está realizando.
- *Influencia de la difusión térmica.* El endurecimiento con láser de potencia se encuentra limitado por la difusión térmica del material. Cuando se incrementa la densidad de potencia del láser por encima de un límite determinado la profundidad del endurecimiento disminuye. Esto se debe a que la temperatura de la superficie aumenta rápidamente con el incremento de la densidad de potencia del láser, lo que requiere tiempos de exposición menores con velocidades de barrido elevadas, con lo que la profundidad que alcanza la temperatura de temple es menor. Por el contrario, si se buscan densidades de potencia pequeñas con grandes tiempos de exposición del material el inconveniente es que tiene lugar una gran difusión térmica hacia el interior de la pieza, con lo que se calienta excesivamente. Cuando al pasar el haz cesa la radiación láser en un punto, debido a la termostatación del material, el gradiente térmico en la pieza no permite alcanzar los ratios de enfriamiento superficial necesarios para que se produzca el temple.
- *Profundidad de endurecimiento limitada.* La profundidad de endurecimiento depende tanto de la composición del material, que determina su templabilidad, como de los parámetros del proceso. En el temple de aceros con láser no se sue-



len alcanzar profundidades de temple mayores de 2.5 mm. El valor de la dureza que se obtiene con este procedimiento es igual o superior a la que se obtiene mediante procedimientos convencionales, posiblemente por el rápido enfriamiento del procedimiento con láser, que provoca mayores tensiones residuales.

- *Templado de aceros de bajo contenido en carbono.* El láser permite templar todos los materiales templables con procedimientos convencionales. Existen además ciertos materiales, como los aceros de bajo contenido en carbono, que no son templables con procedimientos convencionales pero sí lo son mediante láser. Esto es debido a los elevados gradientes térmicos que se pueden obtener con el láser de potencia. Los aceros ideales para ser endurecidos con láser son aquellos que han sido previamente bonificados o normalizados, pues la disolución de los carburos durante el calentamiento se realiza mejor.
- *Relación máxima dureza-contenido en carbono.* La dureza que se obtiene con el endurecimiento con láser depende en cualquier caso, del contenido en carbono. En un acero con un contenido del 0.4 % de C, la dureza Vickers que se obtiene para un 50 % de martensita es de 405 HV, para un 90 % de martensita se obtienen 500 HV y cuando el contenido de martensita es del 99.9 % la dureza es de 615 HV [MIGLIORE 1996].

## 2.4 Parámetros generales de los tratamientos térmicos con láser

En este apartado se resumen los parámetros que influyen en los tratamientos térmicos con láser, algunos de los cuales ya han sido estudiados en apartados anteriores.

Aunque los parámetros de las variables de los tratamientos térmicos superficiales con láser dependen del material concreto que se va a procesar y de las propiedades metálicas que se pretende lograr con el tratamiento, es posible realizar una serie de consideraciones generales en lo que respecta a los parámetros de tratamiento y que se pueden tener en cuenta antes de realizar un estudio con profundidad.

En los procesos de temple por láser se producen capas de martensita superficiales que muestran un excelente comportamiento en dureza y elevada resistencia al desgaste y a la fatiga. La mayoría de los aceros que pueden ser templables por métodos convencionales, también lo pueden ser por láser. A pesar de eso, y debido a los tiempos muy breves del ciclo de endurecimiento, la estructura de la matriz es un parámetro a tener en cuenta.

### 2.4.1 Consideraciones generales sobre los parámetros del proceso

Los parámetros generales de los procesos de endurecimiento láser son:

- Las densidades de potencia del haz láser serán del orden de entre  $500 \text{ W cm}^{-2}$  y  $5000 \text{ W cm}^{-2}$ . Estas densidades de potencia se combinarán con tiempos de interacción de entre 0.1 s y 10 s.
- Dentro del rango de densidades de potencia y tiempos de exposición característicos de los tratamientos térmicos superficiales con láser, los materiales muy endurecibles se procesarán con densidades de potencia relativamente bajas y tiempos de exposición relativamente largos. Con ello se logra una penetración térmica adecuada sin temperaturas excesivamente altas en la superficie del material. Cuanto menos endurecible es el material, mayores serán las densidades de potencia y menores los tiempos de exposición.
- La temperatura máxima de la superficie es aproximadamente proporcional a la raíz cuadrada de la velocidad de exposición, tal como señala el modelo semicuantitativo de *Steen y Courtney*, que se describe en 3.1.2. Por lo tanto debe de tenerse en cuenta que duplicar la potencia del láser requiere cuadruplicar la velocidad de exposición para que las temperaturas máximas en la superficie sean equivalentes.
- El aumento de la densidad de potencia hace disminuir el ingreso de energía en el volumen del sólido para una temperatura de la superficie determinada, por el efecto del aumento de la velocidad de exposición.
- El tiempo de exposición dependerá de la estructura del acero. Así son necesarios tiempos de exposición relativamente altos para aceros normalizados, templados o con estructuras globulizadas, aceros con estructuras proeutécticas e hierros fundidos con carburos aleados en forma estable. Como la temperatura de austenización se alcanza rápidamente y siendo por consiguiente el tiempo de difusión del carbono muy breve, se consiguen mejores resultados con materiales de matrices bainíticas o perlíticas con contenidos medio-alto en carbono [RÖMER 1999], [AMENDE 1984].
- Si las dimensiones de la pieza a procesar son pequeñas las densidades de potencia serán altas y los tiempos de exposición pequeños, para evitar la termalización de la pieza. Otra posibilidad es acoplar un disipador a la pieza.

### 2.4.2 Parámetros que influyen en el proceso de temple

Los parámetros que influyen en el proceso de temple se dividen en *parámetros de la pieza*, *parámetros del láser* y *parámetros particulares del tratamiento* a realizar. En estos últimos se incluyen todos aquellos parámetros que no dependen de la pieza ni del láser.

#### Parámetros de la pieza

Entre los parámetros de la pieza se distinguen dos grupos de parámetros: los que dependen del material y los que dependen de la geometría de la pieza.

Los *parámetros del material* definen las características físicas, ópticas y térmicas del material de la pieza. Estas características son las que determinan las posibilidades de tratar térmicamente la pieza. Los parámetros del material que tienen una mayor influencia en el proceso son:

- *Absortancia*. Determina la proporción de energía que absorbe el material respecto a la energía que incide sobre el material.
- *Capacidad calorífica*. Determina la relación que hay entre la energía que absorbe la pieza y el incremento de temperatura que tiene lugar.
- *Conductividad térmica*. Caracteriza la capacidad de transmisión de calor por conducción en el interior del material e influye significativamente en la velocidad de enfriamiento de la pieza.
- *Densidad*. Es la relación entre la masa y el volumen del material. Junto con la capacidad calorífica y la conductividad térmica influye en el calentamiento de la pieza al absorber energía.

Estos parámetros son altamente dependientes de la temperatura. No permiten modificación externa o control sobre los mismos, excepto la absortancia que puede ser modificada antes de la realización del proceso mediante la modificación de la superficie de la pieza.

Los *parámetros de la geometría* de la pieza son aquellos que definen dimensionalmente la pieza. Puesto que la transmisión de calor en la pieza tiene lugar fundamentalmente en la dirección de incidencia del haz, la dimensión de la pieza más importante suele ser el espesor de la pieza, que es la dimensión de la pieza en la dirección de incidencia del haz. Otras dimensiones son menos importantes, pero en casos como piezas de anchura crítica es posible que el material no pueda disipar rápidamente la energía incidente, por lo que las dimensiones en ese caso sí son importantes.

### Parámetros del láser

Los parámetros del láser están relacionados tanto con el tipo de haz que emite el resonador como con la óptica de focalización. Estos parámetros son los que determinan la densidad de energía que se irradia sobre la pieza y la zona sobre la que incide la radiación.

Los parámetros del láser son la longitud de onda de la radiación, el modo del haz, la dimensión del haz en la zona de incidencia sobre la pieza, y la potencia del haz láser.

- *Longitud de onda de la radiación.* La longitud de onda de la radiación depende del tipo de resonador láser que se emplea para realizar el proceso. Este parámetro sólo es modificable en el caso de láseres sintonizables, que no se emplean en el tratamiento de materiales metálicos. En aplicaciones industriales de tratamiento térmico de materiales se emplean fundamentalmente láser de CO<sub>2</sub>, cuya longitud de onda es de 10.6  $\mu\text{m}$ , y láseres de Nd:YAG, con una longitud de onda de 1.06  $\mu\text{m}$ . Como ya se ha explicado en la página 33, la longitud de onda condiciona la absorción de energía por parte del material procesado.
- *Modo del haz.* El modo del haz define la distribución de energía sobre una sección transversal del haz y depende de la óptica empleada en la cavidad resonante y de la trayectoria desde ésta hasta el cabezal.
- *Dimensión del haz en la zona de incidencia sobre la pieza.* La dimensión del haz que incide sobre la pieza determina la densidad de energía irradiada sobre la pieza y la zona sobre la que incide la radiación. En la soldadura o el corte con láser es necesario conocer el punto de focalización, la longitud focal, el tamaño de la mancha de luz y la profundidad de foco, pues se busca operar con el láser focalizado y estos parámetros son importantes. Sin embargo, en los tratamientos térmicos con láser estos parámetros no son tan importantes pues se trata de actuar con el haz desfocalizado. Por lo tanto, el parámetro de mayor interés es la dimensión del haz en la zona de incidencia sobre la pieza.
- *Potencia del haz láser.* Es la energía por unidad de tiempo que el resonador láser genera en forma de haz. La potencia del láser, junto con la geometría y tamaño del haz en el punto de incidencia y con la absorción del material, determinan la densidad de energía que penetra en el material. Por lo tanto la potencia del haz láser es uno de los parámetros más importantes en el tratamiento térmico superficial de materiales metálicos. Los valores de potencia que puede suministrar un equipo láser dependen básicamente del tipo de láser y del tamaño del resonador. Los láseres de CO<sub>2</sub> utilizados industrialmente suelen tener potencias de entre 2000 W y 10 000 W.



### Parámetros particulares del tratamiento a realizar

En este grupo de parámetros se incluyen todos aquellos que no dependen del material ni del haz láser. Dependen básicamente de la velocidad de proceso y del gas de aporte. Los parámetros que dependen del gas de aporte con el tipo de gas a emplear, el caudal del gas y la dirección de incidencia del flujo de gas respecto al haz.

- *Tipo de gas de aporte.* En los tratamientos térmicos superficiales el gas de aporte se utiliza fundamentalmente para proteger el sistema óptico de posibles partículas de material que se desprendan por cualquier razón. Por lo tanto la importancia del tipo de gas será menor que en otros procesos donde se utilizan gases para asistir el proceso, como puede ser el oxígeno en el caso del corte. De todos modos dado que a las temperaturas usuales de temple se puede producir oxidación de la superficie metálica, el uso de gases inertes (Argón, Helio, por ejemplo) puede evitar este efecto no deseado.
- *Caudal del gas y dirección de incidencia del flujo.* En el caso del tratamiento térmico superficial la variación del flujo de gas influye muy poco en el proceso. La influencia del gas de aporte se debe al efecto de las pérdidas por transmisión de calor por convección que origina el flujo de gas.
- *Velocidad del proceso.* La velocidad del proceso se refiere al movimiento relativo entre la pieza y el haz láser. Este movimiento determina el tiempo de exposición a la radiación láser de los puntos la superficie de la pieza procesada. La relación entre la velocidad de barrido del haz y su efecto es fuertemente no lineal. Como en cualquier aplicación industrial del láser, la velocidad es un parámetro determinante en el resultado del proceso de tratamiento térmico, pues determina la cantidad de energía total que absorbe cada uno de los puntos de la superficie de la pieza. La velocidad también influye en la anchura de la zona afectada y en los ciclos de calentamiento y enfriamiento que ocurren en el material.

## Capítulo 3

# Modelización de tratamientos térmicos superficiales por láser

La identificación de los parámetros adecuados para un determinado proceso de tratamiento térmico superficial con láser puede realizarse mediante simulaciones por computador. Una posibilidad que permite llevar a cabo la simulación del proceso consiste en el desarrollo de un modelo numérico que permita predecir los resultados de los procesos de tratamiento térmico superficial en distintas condiciones.

Un modelo numérico para el estudio de los resultados del procesamiento del material debe de representar los procesos físicos que tienen lugar al realizar el proceso, para poder predecir el efecto que se va a producir en la pieza. En concreto se trata de utilizar esta simulación para obtener la distribución de la temperatura superficial de la pieza que se está tratando para determinar donde está situado el punto de mayor temperatura respecto al punto de incidencia del haz láser para diferentes condiciones de velocidad, diámetro de haz y potencia total y para una determinada distribución transversal del haz láser. Además se pueden determinar los ciclos térmicos que tiene lugar tanto en superficie como en profundidad que permitirán, en función de las características del material bajo tratamiento, realizar estimaciones de las durezas que se pueden lograr con el tratamiento.

### 3.1 Transmisión de calor en procesos de tratamiento térmico superficial

El estudio del flujo de calor que se produce cuando se realiza un tratamiento térmico superficial con láser es fundamental para la determinación del efecto metalúrgico que tendrá lugar en la pieza. El análisis de la transmisión de calor en estos procesos

se puede realizar mediante numerosos modelos analíticos [GARCÍA 1999] que se basan en la búsqueda de una solución matemática de la ecuación de transmisión de calor. Otros métodos que se emplean para el modelado del problema son los métodos semi-cuantitativos y los métodos numéricos, estos últimos ampliamente utilizados para la resolución de problemas de gran complejidad.

Uno de los aspectos más importantes para caracterizar un tratamiento térmico es la transmisión de calor, pues será la que definirá el campo de temperaturas que se va a obtener en la pieza al aplicar la radiación, así como los ciclos térmicos que van a tener lugar a diferentes profundidades y por lo tanto el tipo de transformaciones metalúrgicas que tendrán lugar en cada punto de la pieza. Los mecanismos de transmisión de calor que tienen lugar en la pieza durante los tratamientos térmicos son los responsables de la transferencia de energía por conducción, las pérdidas por convección y las pérdidas por radiación.

#### Ecuación de la transferencia de energía por vía térmica

En los procesos de tratamiento térmico superficial de materiales metálicos con láser la irradiación se realiza con intensidades muy elevadas. Por este motivo se produce, fundamentalmente, la termalización y el transporte de calor por conducción en el material. El proceso está gobernado por la ecuación conducción de calor en sólidos en tres dimensiones, que es:

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} - \nabla \cdot (\bar{k} \nabla T) = E(r, t) \quad (3.1)$$

Para un sistema de coordenadas cartesianas, suponiendo que el tensor de la conductividad térmica es diagonalizable, la expresión se puede escribir como:

$$\begin{aligned} \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( k_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( k_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) + E(x, y, z, t) = \\ = \nabla \cdot (k \nabla T) + E(x, y, z, t) \end{aligned} \quad (3.2)$$

donde  $\rho$  es la densidad del material,  $k$  la conductividad térmica,  $C_p$  el calor específico,  $T$  la temperatura,  $x, y, z$ , las coordenadas espaciales,  $t$  el tiempo y  $E$  está relacionada con las propiedades del haz aplicado (energía proporcionada por unidad de tiempo y volumen).

El problema de la resolución analítica de la ecuación planteada se encuentra en que la dependencia con la temperatura tanto de las propiedades térmicas del material como de la energía absorbida dan lugar a una ecuación no lineal. Mediante métodos numéricos es posible obtener soluciones de las ecuaciones si se conoce la variación con la temperatura de las propiedades térmicas y de la absorción.

Si se supone que el material es homogéneo e isótropo y que las propiedades térmicas del material no dependen de la temperatura, la expresión de la transmisión de calor se reduce a la siguiente:

$$\nabla^2 T - \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{E(x, y, z, t)}{k} \quad (3.3)$$

donde  $\alpha = k \cdot \rho^{-1} \cdot C_p^{-1}$  es la difusividad térmica del material.

En el caso de que no haya fuente de calor:

$$\nabla^2 T = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (3.4)$$

Y en el caso estacionario, la expresión

$$\frac{\partial T}{\partial t} = 0 \quad (3.5)$$

por lo que la expresión 3.3 se reduce a la ecuación de Poisson:

$$\nabla^2 T = \frac{E(x, y, z, t)}{k} \quad (3.6)$$

En el caso estacionario en el que no hay fuente de calor la expresión toma la forma de la ecuación de Laplace:

$$\nabla^2 T = 0 \quad (3.7)$$

A partir de las ecuaciones que gobiernan la transmisión de calor pueden extraerse conclusiones muy importantes en los procesos de tratamiento térmico superficial de materiales metálicos con láser.

### Pérdidas por convección

Las pérdidas por convección durante los procesos de tratamiento térmico superficial de materiales metálicos tienen su origen en la transmisión de calor por convección entre la superficie de la pieza que es tratada y el medio fluido que la rodea. La ecuación que gobierna la transmisión de calor por convección entre un medio sólido y un medio fluido es la siguiente:

$$q_{conv} = h_c (T - T_f) \cdot ds \quad (3.8)$$

donde  $h_c$  es el coeficiente de transmisión de calor por convección,  $T$  es la temperatura de la superficie y  $T_f$  es la temperatura del fluido que rodea la superficie. Las pérdidas totales originadas por la convección en la superficie de transmisión  $S_c$  son las siguientes:

$$P_{conv} = \iint_{S_c} h_c (T - T_f) \cdot ds \quad (3.9)$$



El valor del coeficiente de transmisión de calor por convección depende de la superficie del material y de las características del medio fluido que lo rodea.

La determinación del valor del coeficiente de transmisión de calor por convección se realiza empleando el análisis dimensional, que proporciona expresiones para diferentes casos de transmisión de calor por convección. En las Tablas 3.1 y 3.2 se muestran las expresiones de convección libre en placas horizontales y de convección forzada en placas, respectivamente, que son aplicables a los procesos de tratamiento térmico superficial de metales con láser.

Tabla 3.1: *Convección libre en placas horizontales.*

Tipo de flujo	Condición	Expresión de $N_u$	Fórmula simplificada
Laminar (cara sup. caliente, inf. Fría)	$10^5 < G_r \cdot P_r < 2 \text{ E}+07$	$N_u = 0.54 (G_r \cdot P_r)^{\frac{1}{4}}$	$h_c = 1.13 \left(\frac{\Delta T}{L}\right)^{\frac{1}{4}}$
Laminar (cara sup. Fría, inf. caliente)	$10^5 < G_r \cdot P_r < 2 \text{ E}+07$	$N_u = 0.25 (G_r \cdot P_r)^{\frac{1}{4}}$	$h_c = 0.50 \left(\frac{\Delta T}{L}\right)^{\frac{1}{4}}$
Turbulento (cara sup. Fría, inf. caliente)	$2 \text{ E}+07 < G_r \cdot P_r < 3 \text{ E}+10$	$N_u = 0.14 (G_r \cdot P_r)^{\frac{1}{3}}$	$h_c = 1.31 \left(\frac{\Delta T}{L}\right)^{\frac{1}{3}}$

Tabla 3.2: *Convección forzada en placas.*

Tipo de flujo	Condición	Expresión de $N_u$	Fórmula simplificada
Laminar	$Re < 4 \text{ E}+05; P_r \leq 0.6$	$N_u = 0.54 (G_r \cdot P_r)^{\frac{1}{4}}$	—
Turbulento	$Re < 4 \text{ E}+05; P_r \geq 0.6$	$N_u = P_r^{\frac{1}{3}} \left( 0.037 Re^{\frac{1}{2}} - 872 \right)$	—
Turbulento	Para aire	$N_u = 0.75 (Re \cdot P_r)^{\frac{1}{4}}$	—
Turbulento	Para $v < 5 \text{ m s}^{-1}$	—	$h_c = 5 + 3.4v$
Turbulento	Para $v < 5 \text{ m s}^{-1}$	—	$h_c = 6.14 \cdot v^{0.78}$

En las expresiones para la determinación del coeficiente de convección se puede ver la importancia de los números adimensionales de Nusselt ( $N_u$ ), Grashof ( $G_r$ ), Reynolds ( $Re$ ) y Prandtl ( $P_r$ ), cuyas expresiones son las siguientes:

$$N_u = \frac{h_c L}{k_f} \quad (3.10)$$

$$G_r = \frac{L^3 \rho^2 g \beta \Delta T}{\mu^2} \quad (3.11)$$

$$Re = \frac{v \rho_f L}{\mu_f} \quad (3.12)$$

$$P_r = \frac{\mu_f C_{pf}}{k_f} \quad (3.13)$$

En los números adimensionales anteriores  $L$  es la longitud característica en el proceso,  $g$  la aceleración de la gravedad,  $\Delta T$  la diferencia de temperatura entre el medio fluido y la superficie, y  $\rho_f$ ,  $C_{pf}$ ,  $k_f$ ,  $\mu_f$ ,  $\beta$  y  $v$ , la densidad, la capacidad calorífica, la conductividad térmica, la viscosidad dinámica, el coeficiente de dilatación volumétrico y la velocidad del fluido, respectivamente. Para la determinación de las propiedades del fluido, fuertemente dependientes de la temperatura, se utiliza la temperatura media entre la temperatura de la superficie y la temperatura del fluido en la zona alejada de la superficie, es decir,  $T_m = (T_s + T_f)/2$ .

Para una primera estimación de las pérdidas por convección que tienen lugar en los procesos de tratamiento térmico superficial de materiales metálicos se puede utilizar la expresión de la convección forzada en placas para flujo laminar, y suponiendo las siguientes condiciones: temperatura máxima alcanzada en la superficie de 1700 K; atmósfera de nitrógeno con  $T_f = 298$  K,  $k_f = 0.026 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ ,  $P_r = 0.71$ ,  $\mu_f = 1.6 \cdot 10^{-5} \text{ kg m}^{-1} \text{ s}^{-1}$ ; longitud característica  $L = 1$  cm; velocidad del fluido  $v = 100 \text{ m s}^{-1}$  en régimen estacionario. En estas condiciones las pérdidas son aproximadamente de  $55 \text{ W cm}^{-2}$ .

### Pérdidas por radiación

Las pérdidas por radiación se producen cuando la superficie del material expuesto a la radiación láser se calienta y emite radiación hacia el medio que lo rodea, que se encuentra a menor temperatura. Las pérdidas de energía por radiación están determinadas por la ecuación de transmisión de calor por radiación:

$$P_{rad} = \iint_{S_R} \varepsilon \sigma T^4 ds \quad (3.14)$$

donde,

$\varepsilon$ : emisividad

$\sigma$ : constante de Stefan-Boltzmann  $= 5.67051 \times 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$

$T$ : temperatura absoluta del cuerpo

$S_R$  la superficie de transmisión por radiación.

Las pérdidas de energía por radiación son importantes en la zona de la superficie que se encuentra a elevada temperatura, por lo que sólo serán significativas en la zona más próxima a la expuesta al haz láser.

Se puede hacer una primera estimación del orden de magnitud de las pérdidas por radiación durante los procesos de tratamiento térmico superficial de materiales metálicos tomando una emisividad  $\varepsilon = 0.5$ , una superficie radiante  $S_R$  de  $1 \text{ cm}^2$ , y

suponiendo que la temperatura es la misma en toda la superficie radiante. En estas condiciones, para una temperatura absoluta de la superficie de 300 K (prácticamente temperatura ambiente) las pérdidas por radiación son de 0.023 W. Si la temperatura de la superficie son 800 K las pérdidas por radiación son de 1.16 W, mientras que para temperaturas de 1500 K estas pérdidas serán del orden de 14.35 W. Según la expresión de las pérdidas por radiación, la energía emitida por radiación es proporcional a la temperatura de la superficie a la cuarta, de ahí el fuerte aumento con la temperatura de las pérdidas por radiación.

Si se supone una emisividad  $\varepsilon = 1$  y una temperatura máxima alcanzada en la superficie de 1700 K en régimen estacionario, el orden de magnitud de las pérdidas será de  $50 \text{ W cm}^{-2}$ . Esta magnitud se puede tomar como una estimación del máximo valor que pueden tener las pérdidas por radiación en los procesos de tratamiento térmico superficial de materiales metálicos con láser.

En la simulación de procesos de tratamiento térmico superficial de aceros es posible aproximar las pérdidas por radiación asimilándolas a las pérdidas por convección. En este caso el valor del coeficiente de transmisión de calor por convección debe de ser promediado para incluir tanto la convección como la radiación. La aproximación señalada por Kechemair [KECHEMAIR 1989] supone una temperatura máxima alcanzada en la superficie de  $892^\circ\text{C}$  y una emisividad de la superficie  $\varepsilon = 0.9$  y obtiene un coeficiente de transmisión promediado de  $400 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$ .

### 3.1.1 Soluciones analíticas

Los modelos analíticos permiten obtener una solución del problema de transmisión de calor expresada de forma analítica. Se utilizan con gran difusión modelos analíticos sencillos, basados en la hipótesis de flujo de calor unidimensional, pues son de gran utilidad para evaluar y estimar rangos adecuados en los parámetros de los procesos. Proporcionan una gran cantidad de información con un coste muy bajo y en muy poco tiempo.

El principal inconveniente de los modelos analíticos en general y de los más sencillos en particular, se encuentra en la necesidad de que las hipótesis de trabajo sean simples. En general, las condiciones de contorno tienen que ser simétricas, la probeta de material debe de presentar configuraciones sencillas y las propiedades térmicas de los materiales independientes de la temperatura. Si no se aceptan como válidas estas condiciones, la ecuación de transferencia de calor no puede ser resuelta analíticamente, por lo que para su resolución se tiene que recurrir a métodos numéricos.

Carslaw y Jaeger [CARLSLAW 1959] han recopilado soluciones analíticas para un gran número de problemas de conducción de calor en sólidos, bajo diversas condiciones

e hipótesis.

Los modelos analíticos que se presentan a continuación se basan en las hipótesis de que el material es isótropo y que sus propiedades térmicas son constantes. En general se supone que toda la energía del haz se absorbe en la superficie del material, de tal forma que no existe ni reflectancia ni transmitancia, es decir, el coeficiente de atenuación de la radiación en la superficie del material se considera infinito.

### Modelos analíticos para flujo de calor en una dimensión

Si el calor fluye en una sola dirección y no existe convección o generación de calor, la ecuación básica se convierte en:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (3.15)$$

Si se asume que hay una entrada de calor en la superficie extendida constante y propiedades térmicas constantes, sin pérdida de calor radiante o fusión, entonces las condiciones de contorno son (siendo  $F_0$  la densidad de potencia superficial):

$$\text{para } z = 0 ; F_0 = \frac{P_{tot}(1 - r_f)}{A} = -k \left[ \frac{\partial T}{\partial z} \right]_{\text{sup}} \quad (3.16a)$$

$$\text{para } z = \infty ; \frac{\partial T}{\partial z} = 0 \quad (3.16b)$$

$$\text{para } t = 0 ; T = T_0 \quad (3.16c)$$

la solución es:

$$T_{z,t} = \frac{2F_0}{k} \left\{ (\alpha t)^{\frac{1}{2}} \text{ierfc} \left[ \frac{z}{2\sqrt{\alpha t}} \right] \right\} \quad (3.17)$$

donde la “integral de la función de error complementaria”,  $\text{ierfc}(u)$ , significa:

$$\text{ierfc}(u) = \frac{e^{-u^2}}{\sqrt{\pi}} - u [1 - \text{erf}(u)] \quad (3.18)$$

La función de error  $\text{erf}(u)$  se puede aproximar mediante un polinomio:

$$\text{erf}(u) = 1 - (a_1 b + a_2 b^2 + a_3 b^3) e^{-u^2} \quad (3.19)$$

donde:

$$\begin{aligned} b &= (1 + cu)^{-1} & a_1 &= 0.348\,024\,2 \\ & & a_2 &= -0.095\,879\,8 \\ & & a_3 &= 0.747\,855\,6 \\ & & c &= 0.470\,47 \end{aligned} \quad (3.20)$$



Si se deja de aplicar la potencia, el material se enfriará de acuerdo con la siguiente relación:

$$T_{z,t} = \frac{2F_0}{k} \sqrt{\alpha} \left[ \sqrt{t} \operatorname{ierfc} \left( \frac{z}{2\sqrt{\alpha t}} \right) - \sqrt{t_0 - t_1} \operatorname{ierfc} \left( \frac{z}{2\sqrt{\alpha(t - t_1)}} \right) \right] \quad (3.21)$$

donde las variables son

$T$ = temperatura	$^{\circ}\text{C}$	$k$ = conductividad térmica	$\text{W/m K}$	
$z$ = profundidad	$\text{m}$	$\alpha$ = difusividad térmica	$\text{m}^2 \text{s}^{-1}$	
$t$ = tiempo	$\text{s}$	$t_0$ = tiempo inicia potenc.	$\text{s}$	
$t_1$ = tiempo apagado	$\text{s}$	$F_0$ = dens. pot. absorbida	$\text{W m}^{-2}$	

(3.22)

Este modelo proporciona una estimación de la extensión de los procesos de conducción cuando el flujo de calor es prácticamente unidireccional. Esta suposición será razonablemente correcta cuando la fuente de calor es grande en comparación con la profundidad considerada o cuando el flujo de calor tiene lugar en una barra o en una geometría similar. Pero este cálculo no permite ninguna consideración acerca del tamaño o de la forma del haz, y la velocidad tan sólo se simula con el tiempo en el que se aplica la potencia, además de que no se permiten consideraciones del espesor de la pieza.

Las soluciones de este modelo son útiles para la estimación de velocidades de calentamiento, gradientes térmicos y velocidades de enfriamiento.

### Modelos analíticos para una fuente puntual estacionaria

**La fuente puntual instantánea** La ecuación diferencial para la conducción de calor en un medio estacionario, asumiendo que no hay convección ni radiación, es:

$$\left[ \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right] = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (3.23)$$

En el caso de una fuente puntual instantánea de energía  $Q\rho C$  la solución es la siguiente:

$$T = \frac{Q}{8(\pi\alpha t)^{\frac{3}{2}}} e^{-\frac{(x-x')^2 + (y-y')^2 + (z-z')^2}{4\alpha t}} \quad (3.24)$$

Donde  $Q$  es el producto del volumen por la temperatura. Si  $t \rightarrow 0$  esta expresión tiende a cero en todos los puntos excepto los puntos fuente ( $x'$ ,  $y'$ ,  $z'$ ) donde se hace infinito. La cantidad total de calor en una región infinita es:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \rho C T dx dy dz = \frac{Q\rho C}{8(\pi\alpha t)^{\frac{3}{2}}} \int_{-\infty}^{+\infty} e^{-\frac{(x-x')^2}{4\alpha t}} dx \int_{-\infty}^{+\infty} e^{-\frac{(y-y')^2}{4\alpha t}} dy \int_{-\infty}^{+\infty} e^{-\frac{(z-z')^2}{4\alpha t}} dz \quad (3.25)$$

La solución 3.24 puede ser interpretada como la temperatura en un sólido infinito correspondiente a una cantidad de energía  $Q\rho C$  generada instantáneamente en  $t = 0$  en el punto  $(x', y', z')$  y que representa la temperatura a la cual se elevará una unidad de volumen del material por la presencia de la fuente puntual instantánea.

**La fuente puntual continua** El calor no es una cantidad vectorial, por lo que los efectos de diferentes fuentes de calor pueden ser superpuestos. Si el calor es liberado a un ratio de  $\phi(t)\rho C$  por unidad de tiempo desde  $t = 0$  hasta  $t = t$  en el punto  $(x', y', z')$ , la temperatura en  $(x, y, z)$  en el instante  $t$  se obtiene integrando la ecuación 3.24 para el caso de una fuente puntual instantánea sobre ese periodo de tiempo:

$$T(x, y, z, t) = \frac{1}{(8\pi\alpha)^{\frac{3}{2}}} \int_0^t \phi(t') e^{-\frac{r^2}{4\alpha(t-t')}} \frac{dt'}{(t-t')^{\frac{3}{2}}}$$

donde  $r^2 = (x - x')^2 + (y - y')^2 + (z - z')^2$

Si  $\phi(t)$  es constante e igual a  $q$ , tendremos:

$$T = \frac{q}{4(\pi\alpha)^{\frac{3}{2}}} \int_{\frac{1}{\sqrt{t}}}^{\infty} e^{-\frac{r^2\tau^2}{4\alpha}} d\tau = \frac{q}{4\pi\alpha r} \operatorname{erfc}\left(\frac{r}{\sqrt{4\alpha t}}\right) \quad (3.26)$$

donde  $\tau = (t - t')^{-\frac{1}{2}}$ . Si  $t \rightarrow \infty$  la expresión se reduce a  $T = \frac{q}{4\pi\alpha r}$ , que corresponde a una distribución de temperaturas fija en la que se introduce continuamente una fuente de calor constante en el punto  $(x', y', z')$  y se difunde hacia el exterior en un sólido infinito.

### Otras fuentes no puntuales

Integrando la solución de la fuente puntual sobre un área es posible calcular el calentamiento en el caso de fuentes lineales, fuentes circulares, fuentes gaussianas, o cualquier otra distribución definible.

La solución para el punto central de la superficie bajo una fuente Gaussiana estacionaria que se obtiene de esta forma es:

$$T_{contGauss}(0, 0, t) = \frac{2P(1 - r_f)D}{\pi D^2 k \sqrt{T}} \tan^{-1} \left[ \frac{2(\sqrt{\alpha t})}{D} \right] \quad (3.27)$$

para la cual la temperatura de equilibrio será la siguiente:

$$T(0, 0, \infty) = \frac{P(1 - r_f)D}{D^2 k \sqrt{\pi}} \quad (3.28)$$

de donde se puede obtener la siguiente relación:

$$\frac{T\pi kD}{P(1-r_f)} = \sqrt{\pi} = 1.77 \quad (3.29)$$

Esta relación puede resultar de gran interés para calcular la máxima temperatura posible si se supone que el único mecanismo de transmisión de calor es la conducción hacia el interior del sólido.

### Modelos analíticos para una fuente puntual móvil

Integrando la solución para la fuente puntual sobre el tiempo y simulando el movimiento con el cambio de variable  $x = (x_0 + vt)$ , Rosenthal desarrolló ecuaciones de gran utilidad en el análisis de problemas fundamentalmente de soldadura. Tres de las ecuaciones de Rosenthal son de particular interés: la solución unidimensional para una línea de soldadura fundiendo; la solución bidimensional para una fuente lineal móvil, útil en la simulación de un keyhole sobre una soldadura de chapa delgada; y la fuente puntual móvil tridimensional, que se emplea para simular tratamientos superficiales láser o soldadura de chapa gruesa.

La solución para la fuente puntual móvil asume una pieza de trabajo semi-infinita, que no existen pérdidas radiantes, que no se produce fusión en el material, y que las propiedades térmicas del material son constantes en el rango de temperaturas involucrado. La solución es:

$$T - T_0 = \frac{Q}{2\pi k} e^{-\frac{vx}{2\alpha}} \cdot \frac{e^{-\frac{vR}{2\alpha}}}{R} \quad (3.30)$$

Donde  $R = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$  para las condiciones de contorno siguientes:

$$\begin{aligned} \frac{\partial T}{\partial x} &\rightarrow 0 & \text{para } x &\rightarrow \infty & ; & \frac{\partial T}{\partial y} &\rightarrow 0 & \text{para } y &\rightarrow \infty & ; & \frac{\partial T}{\partial z} &\rightarrow 0 & \text{para } z &\rightarrow \infty \\ \frac{\partial T}{\partial R} 4\pi R^2 k &\rightarrow Q & \text{para } R &\rightarrow 0 & ; \end{aligned} \quad (3.31)$$

De esta solución se obtiene que la velocidad de enfriamiento para un punto superficial de la línea central ( $y = 0, x > 0, z = 0$ ) puede ser calculada como:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = -2\pi k \left( \frac{v}{Q} \right) (T - T_0)^2 \quad (3.32)$$

Esta ecuación permite estimar las velocidades de enfriamiento teóricas para diversos tratamientos superficiales.

### Modelos de calentamiento superficial alternativos

**Fuente lineal hipersuperficial móvil** Existen numerosos modelos de calentamiento superficial que se basan en la solución fundamental para una fuente puntual o una fuente lineal. Un modelo significativo para el procesamiento láser es el de Ashby y Shercliff [SHERCLIFF 1991]. Éstos obtuvieron una solución como desarrollo de la fuente hiperpuntual de Ashby-Easterling [ASHBY 1984], en la cual la fuente de calor es una línea fuente finita móvil situada sobre la superficie y paralela a ella. La ventaja de esta consideración es que permite considerar un pseudodiámetro del haz. Las suposiciones son: la fuente de calor es una línea fuente de ancho finito en la dirección  $y$  e infinitesimalmente pequeña en la dirección  $x$  o de avance del haz láser, de potencia  $q$  (W), siendo  $v$  la velocidad de avance del haz. La pieza es homogénea e isotrópica y tiene propiedades térmicas constantes (conductividad térmica  $\lambda$  y difusividad térmica  $\alpha$ ). No se tienen en cuenta efectos de calor latente, radiación o pérdidas de calor por convección en la superficie. Se considera que la superficie tiene una absortancia  $A$  constante. La pieza de trabajo es semi-infinita.

La solución para la variación de temperatura con el tiempo es:

$$T - T_0 = \frac{\frac{Aq}{v}}{2\pi\lambda [t(t+t_0)]^{\frac{1}{2}}} \exp \left[ -\frac{1}{4\alpha} \left( \frac{(z+z_0)^2}{t} + \frac{y^2}{t+t_0} \right) \right] \quad (3.33)$$

Donde el parámetro  $z_0$  es un valor que resulta de ajustar la ecuación 3.33 para una solución conocida del máximo de temperatura superficial, con lo que las velocidades de enfriamiento son las siguientes:

$$\frac{dT}{dt} = \frac{T - T_0}{t} \left[ \frac{(z+z_0)^2}{4\alpha t} - \frac{1}{2} \left( \frac{2t+t_0}{t+t_0} \right) \right] \quad (3.34)$$

Este modelo aproxima los problemas de tratamiento térmico superficial con bastante precisión.

### Fuente Gaussiana móvil. Modelo Davis y otros

Davis y otros resolvieron el problema de la fuente de calor superficial Gaussiana móvil y obtuvieron una ecuación complicada. Para su aplicación a los problemas de tratamiento térmico superficial derivaron una expresión para la profundidad de endurecimiento asumiendo propiedades térmicas constantes y despreciando las pérdidas superficiales de calor por convección o radiación. También asumieron que no existían efectos de calor latente.



La solución para diámetro del haz  $D$ , la profundidad de endurecimiento,  $d$ , es:

$$d = 0.76D \left[ \frac{1}{\frac{\alpha' C}{q} + \pi^{\frac{1}{4}} \left( \frac{\alpha' C}{q} \right)^{\frac{1}{2}}} - \frac{1}{\frac{\alpha' C}{q_{\min}} + \pi^{\frac{1}{4}} \left( \frac{\alpha' C}{q_{\min}} \right)^{\frac{1}{2}}} \left( \frac{q_{\min}}{q} \right)^3 \right] \quad (3.35)$$

donde

$$\alpha' = \frac{\rho u D C}{2k} ; q = \left[ \frac{2P(1-r_f)}{D\pi^{\frac{3}{2}}k(T_c - T_0)} \right] ; q_{\min} = (0.40528 + 0.586\alpha C)^{\frac{1}{2}} \quad (3.36)$$

siendo  $q_{\min}$  la energía mínima absorbida para la cual puede tener lugar el endurecimiento y

$$C = C_{\infty} - 0.4646(C_{\infty} - C_0)(\alpha C_0)^{\frac{1}{2}} \quad (3.37)$$

Las constantes varían con el material. Para acero En8 son:  $C_{\infty} = 1.599$  y  $C_0 = 0.503$ . Esta expresión es sencilla de resolver en un ordenador personal. Los resultados de esta ecuación aproximan los resultados experimentales con gran precisión.

### 3.1.2 Soluciones semi-cuantitativas

Los modelos semi-cuantitativos presentados por Steen y Courtney llegan a la conclusión de que la profundidad de la transformación de endurecimiento en los procesos de temple superficial es proporcional a la relación  $\frac{P}{(V \cdot D)^{\frac{1}{2}}}$ . La utilidad de dicha relación, que no deja de ser una aproximación, reside en la sencillez con la que es posible relacionar las principales variables del proceso de temple (potencia del láser, velocidad de barrido y diámetro del haz) con la profundidad de la transformación de endurecimiento.

El razonamiento de Steen y Courtney es el siguiente:

La profundidad de penetración de una isoterma determinada está gobernada por las leyes de la transmisión de calor por conducción. Dichas leyes incluyen el número de Fourier. Por lo tanto la profundidad de penetración de la isoterma está determinada por el valor del grupo  $\frac{\Delta x^2}{\alpha \cdot t}$ . El valor de la isoterma a la profundidad determinada por el valor del grupo de Fourier depende de la intensidad de calor, que es directamente proporcional a la potencia del láser  $P$  e inversamente proporcional al diámetro del haz  $D$ , es decir, es directamente proporcional al valor  $P/D$ . El tiempo de calentamiento de un haz móvil está determinado por  $D/V$ , por lo que si las relaciones son lineales tenemos que:

$$\Delta x = A \left( \frac{P}{D} \right) \left( \sqrt{\frac{\alpha D}{V}} \right) \quad (3.38)$$

y por lo tanto:

$$\Delta x = f \left( \frac{P}{\sqrt{DV}} \right) \quad (3.39)$$

que se ajusta bastante bien a los resultados obtenidos de forma experimental.

### 3.1.3 Soluciones numéricas

En los apartados anteriores se han expuesto soluciones para los problemas de conducción de calor en las que se emplean métodos matemáticos para la obtención de soluciones analíticas. Para ello ha sido necesario suponer que el cuerpo conductor se comporta como un medio continuo, a cambio de lo cual ha sido posible obtener una gran información sobre el problema estudiado; es posible conocer la temperatura del cuerpo en cualquier punto y en cualquier instante, se puede estudiar el efecto de diversos parámetros observando como afectan al tratamiento, y con algunas soluciones incluso se puede estudiar el efecto de la modificación de la geometría del cuerpo, etc...

El gran inconveniente que presenta este enfoque del problema es que aunque se han resuelto numerosos problemas de forma analítica, siempre existirá una limitación en cuanto a la cantidad y la complejidad de geometrías del haz y de la pieza que se pueden estudiar. Otro problema es la aplicación de condiciones de contorno específicas para cada problema, pues no se pueden estudiar problemas en los que las condiciones de contorno no son fácilmente expresables de forma matemática. En definitiva, existen numerosos problemas de gran interés que son inabordables desde este enfoque matemático, siendo imposible la obtención de soluciones analíticas. Por este motivo se suele recurrir a métodos numéricos para resolver determinados problemas.

La gran ventaja de los métodos numéricos es que permiten estudiar cualquier problema independientemente de su complejidad. Su limitación de detalle y exactitud en la solución depende básicamente de las limitaciones computacionales. Inevitablemente se obtienen valores numéricos de temperatura en puntos discretos del cuerpo, para intervalos de tiempo discretos. En ningún caso existirá la generalidad de una solución analítica, lo que dificulta en cierta medida el estudio del efecto de diversos parámetros.

Se han desarrollado diversas técnicas de análisis numérico de problemas de conducción de calor. El incremento de la potencia que han experimentado las computadoras durante los últimos años ha contribuido al desarrollo y al aumento de la importancia de los métodos numéricos, pues permiten resolver en poco tiempo problemas de gran complejidad.

Los modelos numéricos tratan de resolver las ecuaciones básicas de la segunda ley de Fourier en todos los puntos internos del sólido, considerando ecuaciones especiales para los contornos que dependerán de cada problema en particular. Es posible enfocar

los problemas sin las restricciones propias de los modelos analíticos. Además de la ya mencionada posibilidad de estudiar geometrías y distribuciones de intensidad del haz complejas, permiten considerar propiedades termofísicas de los materiales dependientes de la temperatura o condiciones de contorno específicas.

Los modelos numéricos se dividen en dos grandes grupos: los modelos de diferencias finitas y los modelos de elementos finitos. Ambos han sido ampliamente estudiados para su adaptación a diversos problemas y facilitar su resolución.

#### **Modelos numéricos de diferencias finitas**

Los modelos de diferencias finitas que se emplean para la aproximación numérica a los problemas de conducción de calor, se fundamentan en el principio básico de la sustitución de la ecuación diferencial para la distribución continua de la temperatura en un sólido por una ecuación de diferencias finitas que se cumpla en un número determinado de puntos del sólido. Herramientas matemáticas como el desarrollo de Taylor permiten obtener una expresión en diferencias finitas a partir de la ecuación diferencial de transmisión de calor.

#### **Modelos numéricos de elementos finitos**

En los modelos de elementos finitos se divide el espacio considerado en elementos de pequeño tamaño, para realizar a continuación un balance de calor para cada elemento. Los elementos en los que se divide el espacio considerado deben de ser lo suficientemente pequeños para que pueda considerarse que en cada uno de ellos la temperatura es constante, lo que permitirá que la aproximación del problema sea exacta.

Los modelos numéricos de elementos finitos requieren un conocimiento aproximado de la forma de la distribución de temperaturas esperada, pues esto permite la discretización del medio de forma adecuada. El tamaño de los elementos debe de ser inversamente proporcional al gradiente de temperaturas, para que el modelo permita obtener una solución precisa sin un coste computacional excesivamente elevado.

### **3.2 Determinación del punto mas caliente mediante números adimensionales**

Como se verá en 4.4.1, se utilizará la temperatura del punto mas caliente de la superficie de la pieza que se va a procesar como referencia para el sistema de control en tiempo real. Como lo que se persigue con ese sistema de control es alcanzar la temperatura adecuada de temple asegurando que ningún punto se sobrepasa la temperatura de fusión del material, evitando con esto la necesidad de mecanizaciones posteriores de

la pieza con el consiguiente ahorro en costes y tiempo empleado en el tratamiento, es fundamental tener localizado y permanentemente controlado ese punto de máxima temperatura.

Como ya hemos visto en la figura 3.13, el ciclo térmico que sufre cualquier punto para el caso del TEM01\* presenta dos máximos, siendo el segundo mayor que el primero. La posición de este segundo máximo depende de la anchura del haz láser en primer lugar, pero también de la velocidad relativa haz-pieza y de las propiedades termofísicas del material, haciendo laboriosa la determinación de la posición de ese punto respecto al centro del haz ya que implica la resolución de la ecuación de calor para cada caso concreto.

El uso de números adimensionales [RAMIL 2004], sobre todo en aquellos casos donde se puedan agrupar las variables en una pequeña cantidad de números adimensionales, va a suponer una clara ventaja para determinar la situación de este máximo.

### Introducción

Se tratará primero de agrupar las variables que rigen el problema (de la conducción de calor en un medio iluminado por una fuente láser) para reducir el número de cálculos posteriores necesarios.

Para un medio homogéneo, infinito y de propiedades constantes, el problema de conducción de calor se puede escribir como

$$\begin{aligned} PDE &: \quad \rho c \frac{\partial T}{\partial t} - \nabla (K \nabla T) = f(\mathbf{r}, t) \\ IC &: \quad T(\mathbf{r}, t = 0) = T_0 \end{aligned} \quad (3.40)$$

donde la fuente de calor  $f(\mathbf{r}, t)$  es un haz de potencia  $q$ , anchura  $\omega$  y cuya posición  $\mathbf{r}(t)$  puede variar con el tiempo con una velocidad  $v$ .

La solución puede escribirse como:

$$T(\mathbf{r}, t) = T_0 + \frac{2\kappa}{K} \int_0^t \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} f(x', y', t') G(|\mathbf{r} - \mathbf{r}'|, t - t') dx' dy' dt' \quad (3.41)$$

En la tabla 3.3 se representan las principales variables del problema con sus unidades y dimensiones:

### Grupos adimensionales

Se pueden obtener una serie de grupos de variables adimensionales.

La ecuación diferencial 3.40 de la conducción de calor, se puede escribir de forma compacta como

$$\frac{1}{\kappa} \frac{\partial T}{\partial t} - \nabla^2 T = \frac{1}{K} f(\mathbf{r}, t) \quad (3.42)$$



Tabla 3.3: Unidades y dimensiones de las magnitudes del problema.

magnitud	símbolo	unidad SI	dimensión
temperatura	$T, T_0$	K	$\Theta$
posición	$x, y, z$	m	L
tiempo	$t$	s	T
densidad	$\rho$	kg/m <sup>3</sup>	ML <sup>-3</sup>
calor específico	$c$	J/(kg K)	L <sup>2</sup> T <sup>-2</sup> $\Theta^{-1}$
conductividad térmica	$K$	W/(m K)	MLT <sup>-3</sup> $\Theta^{-1}$
potencia	$q$	W	ML <sup>2</sup> T <sup>-3</sup>
anchura haz	$\omega$	m	L
velocidad	$v$	m/s	LT <sup>-1</sup>

donde  $\kappa = K/(\rho c)$  es la difusividad térmica con dimensiones L<sup>2</sup>T<sup>-1</sup>. Así, desaparecen  $\rho$  y  $c$ , que son sustituidos por  $\kappa$ .

Con este cambio la dimensión de temperatura sólo aparece en  $T$  y en  $K$  y la masa en  $K$  y en la potencia  $q$ . La combinación de variables que resulta mas sencilla es  $TK/q$  que tiene dimensiones de L<sup>-1</sup>.

A partir de estas consideraciones se pueden obtener diferentes números adimensionales dependiendo de las condiciones de cada proceso:

- Fuente puntual en reposo, estado estacionario.

Las variables son  $\{T, q, K, \kappa, x\}$  Sólo se puede formar un número adimensional:

$$\Pi_1 = \frac{TKx}{q}$$

- Fuente puntual en movimiento uniforme, estado estacionario.

Las variables son  $\{T, q, K, \kappa, x, v\}$ . Además de  $\Pi_1$  se puede formar:

$$\Pi_2 = \frac{vx}{\kappa}$$

- Fuente de anchura  $\omega$  en reposo, estado estacionario.

Las variables son  $\{T, q, K, \kappa, x, \omega\}$ . Además de  $\Pi_1$  se puede formar:

$$\Pi_3 = \frac{x}{\omega}$$

- Fuente de anchura  $\omega$  con velocidad  $v$ , estado estacionario.

Las variables son  $\{T, q, K, \kappa, x, v, \omega\}$ . Tendríamos  $\Pi_1$ ,  $\Pi_2$  y  $\Pi_3$ .

- Fuente puntual en reposo, transitorio.

Las variables son  $\{T, q, K, \kappa, x, t\}$ . Además de  $\Pi_1$  se puede formar:

$$\Pi_4 = \frac{x^2}{\kappa t}$$

- Fuente puntual con velocidad  $v$ , transitorio.

Las variables son  $\{T, q, K, \kappa, x, v, t\}$ . Tendríamos  $\Pi_1$ ,  $\Pi_2$  y  $\Pi_4$ .

- Fuente de anchura  $\omega$  con velocidad  $v$ , transitorio.

Las variables son  $\{T, q, K, \kappa, x, t, v, \omega\}$ . Tendríamos  $\Pi_1$ ,  $\Pi_2$ ,  $\Pi_3$  y  $\Pi_4$ .

Ahora veremos como aparecen estos grupos adimensionales en cada una de las diferentes soluciones de la ecuación de calor.

#### Estado estacionario.

Cuando las condiciones del problema se mantienen fijas, el campo de temperaturas evoluciona a un estado que se mantiene constante en el tiempo. Se puede encontrar esta distribución de régimen permanente eliminando la derivada temporal en la ecuación diferencial 3.40 o, lo que es lo mismo, integrando el transitorio (ecuación 3.41) entre cero e infinito. Se ven, a continuación, diferentes casos de interés.

- Fuente puntual constante en reposo en el origen de coordenadas.

La solución del campo de temperaturas es

$$T(\mathbf{r}, \infty) = T_0 + \frac{q}{2K} \int_0^\infty \frac{e^{-r^2/u}}{\sqrt{\pi u^3}} du = T_0 + \frac{q}{2\pi K r}$$

que se reduce a un número adimensional similar a  $\Pi_1$ , cuyo valor es 1.

$$\Upsilon = \frac{T - T_0}{\frac{q}{2\pi K r}} = 1$$

- Fuente puntual moviéndose sobre la pieza con velocidad  $\vec{v} = v\hat{i}$ .

La solución del campo de temperaturas es

$$T(\mathbf{r}, \infty) = T_0 + \frac{q}{2\pi K} \frac{e^{-2b(x+r)}}{r}$$

siendo  $r = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$  la distancia al origen (que consideramos se mueve con la fuente) y  $b = v/(4\kappa)$  que tiene dimensiones de  $|b| = L^{-1}$ .

Si se definen las variables adimensionales  $X = 2bx$  y  $R = 2br$  que son del tipo de  $\Pi_2$ , se tiene

$$\Upsilon = \frac{T - T_0}{\frac{q2b}{2\pi K}} = \Upsilon(X, R) = \frac{e^{-(X+R)}}{R}$$

- Estado estacionario. Haz TEM01\* moviéndose con velocidad  $\vec{v} = v\hat{i}$ .

Suponemos un proceso donde el haz se está moviendo a velocidad constante por encima del material. Salvo el instante inicial (del orden de uno o dos segundos) donde aún no se ha estabilizado un determinado mapa de temperaturas se puede suponer que es un estado estacionario.

La solución del campo de temperaturas es

$$T(r, \infty) = T_0 + \frac{q}{2\pi K} \int_0^\infty \frac{4[\omega^2((x+bu)^2 + y^2) + u(\omega^2 + 2u)]}{(\omega^2 + 2u)^3 \sqrt{\pi u}} \exp\left[-\frac{2((x+bu)^2 + y^2)}{\omega^2 + 2u} - \frac{z^2}{u}\right] du$$

donde  $\omega$  es la anchura del haz y  $u = 4\kappa(t - t')$  es la variable de integración temporal, con dimensiones de  $L^2$ .

Tomando como unidad de longitud  $r_0 = \omega/\sqrt{2}$ , definiendo las variables adimensionales  $X = x/r_0$ ,  $Y = y/r_0$ ,  $Z = z/r_0$  (que son del mismo tipo que  $\Pi_3$ ) y  $U = u/r_0^2$  y formando un nuevo grupo adimensional con el producto de  $b = v/(4\kappa)$  y  $r_0$  que resulta

$$Pe = br_0 = \frac{v}{4\kappa} r_0$$

que se conoce como número de Peclet,<sup>1</sup> similar al número adimensional  $\Pi_2/\Pi_3$ .

Se llega por fin a la solución

$$\begin{aligned} \Upsilon &= \frac{T - T_0}{\frac{q}{2\pi K r_0}} = \Upsilon(X, Y, Z, Pe) = \\ &= \int_0^\infty \frac{(X + UPe)^2 + Y^2 + U(1 + U)}{(1 + U)^3 \sqrt{\pi U}} e^{-\left[\frac{(X + UPe)^2 + Y^2}{1 + U} + \frac{Z^2}{U}\right]} dU \quad (3.43) \end{aligned}$$

### Aplicación a la determinación del máximo de temperatura

Por la simetría del haz se sabe que la temperatura máxima de encuentra en la línea recorrida por el centro del haz, esto es,  $Ox$ . Entonces, haciendo  $Y = Z = 0$  en la ecuación 3.43

$$\text{máx } \Upsilon = \text{máx } \Upsilon(X, 0, 0, Pe) = \text{máx } \int_0^\infty \frac{(X + UPe)^2 + U(1 + U)}{(1 + U)^3 \sqrt{\pi U}} e^{-\frac{(X + UPe)^2}{1 + U}} dU$$

<sup>1</sup>Al número de Peclet se le conoce como número de Reynolds para el calor por su parecido con  $Re = vl/\nu$ , donde  $v$  es la velocidad del fluido,  $l$  la longitud y  $\nu$  la viscosidad cinemática.

ecuación que hay que resolver numéricamente. Para cada valor de  $Pe$  se toman una serie de valores de  $X$  ( $-2 < X < 0$ ) y se busca la temperatura máxima  $\Upsilon_{m\acute{a}x}$ . Se obtiene así, una tabla de valores de  $\Upsilon_{m\acute{a}x}$  y la coordenada  $X$  que corresponde con esa  $\Upsilon_{m\acute{a}x}$ , que se representa en la figura 3.1. La precisión del resultado viene dado por la precisión en la integral numérica, pero es válido para cualquier proceso donde se den las condiciones de medio homogéneo, infinito y de propiedades constantes.

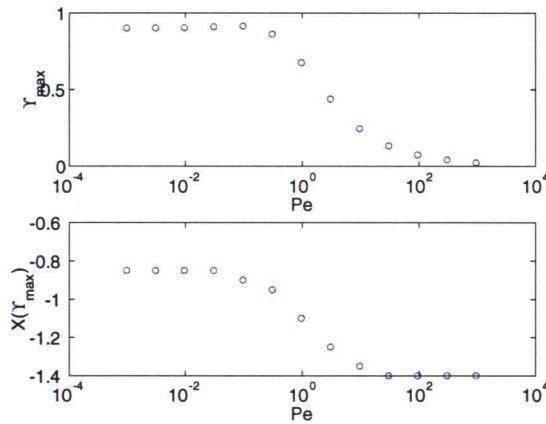


Figura 3.1: Temperatura máxima y su posición como función del número de Peclet.

Para aplicarlo a un caso concreto, se calcula el número de Peclet en función de los parámetros que definen el proceso ( $v, \omega, K, \rho, c$ ) y se interpola en la gráfica para determinar los valores de  $\Upsilon_{m\acute{a}x}$  y de  $X$ . Posteriormente, deshaciendo los cambios, se obtienen los valores deseados de los parámetros.

### Otras aportaciones del método de números adimensionales

Aparte de determinar la situación del punto más caliente, el uso de parámetros adimensionales permite calcular otras magnitudes interesantes de cara a comprender lo que está ocurriendo en el material durante un tratamiento térmico con láser: temperatura máxima, tiempo de calentamiento, profundidad y anchura máximas de una determinada isoterma.

En la hoja 157 se comenta la influencia del nivel de potencia sobre la anchura real del haz y la posible influencia que esto tenga en la situación del punto más caliente.

La ventaja respecto al cálculo mediante modelos es su inmediatez, solo mermada por una precisión algo inferior por las simplificaciones tomadas.



Existen diversos métodos numéricos que han sido desarrollados en distintos proyectos y trabajos de investigación [SAAVEDRA 2004]. Las diferencias entre unos y otros se deben principalmente a las diferentes consideraciones que se han de realizar en función de los objetivos del estudio, en cuanto a geometría del material (rectangular, paralelepípedo o cualquier geometría), proceso (estacionario o transitorio, estático o dinámico), distribución transversal de intensidad del haz (uniforme, rectangular uniforme, gaussiana, anular o cualquier distribución), propiedades termofísicas de los materiales (constantes o dependientes de la temperatura), absortancia de la superficie (constante o dependiente de la temperatura) y las pérdidas que se consideran (convección, radiación, etc) o que se desprecian.

Para los objetivos de esta tesis basta elegir cualquiera de ellos para obtener unas tablas donde se determine la situación del punto mas caliente de la superficie en función de los parámetros del proceso. Se determinarán con al menos dos métodos diferentes para servir de comparación entre sí de los resultados obtenidos antes de tomarlos como útiles en el desarrollo posterior del sistema de control.

### 3.3 Estimación de durezas a partir de los ciclos térmicos

#### 3.3.1 Transformaciones de fase

El modelo para cuantificar la composición de las fases se basa en los diagramas de transformación isotérmicos y en las ecuaciones de Johnson-Mehl-Avrami y Koistinen-Marburger [SAAVEDRA 2004]. La primera ecuación nombrada se aplica a las transformaciones controladas por la difusión del carbono, tanto en el proceso de formación de austenita durante el calentamiento de la pieza, como en la posterior descomposición de la austenita en ferrita, cementita, perlita y bainita. Durante el enfriamiento se emplea la ecuación de Koistinen-Marburger para calcular la transformación martensítica.

En los procesos dominados por la difusión, la fracción volúmica de la fase  $k$  formada cuando el material se mantiene un tiempo  $t$  a la temperatura  $T$  viene dada por

$$y_k(t) = 1 - \exp\{-b_k t^{n_k}\} \quad (3.44)$$

donde  $b_k$  y  $n_k$  son parámetros dependientes de la temperatura.

Para cuantificar las transformaciones de fase modelamos la curva temperatura-tiempo mediante una serie de saltos realizados en pequeños pasos de tiempo isoterms conectados entre sí por cambios de temperatura sobre las líneas de conversión de fase constante, como se indica en la figura 3.2. En cada uno de estos pasos isotérmicos, la determinación del porcentaje de fase formada se calcula siguiendo el proceso que, a continuación se describe.

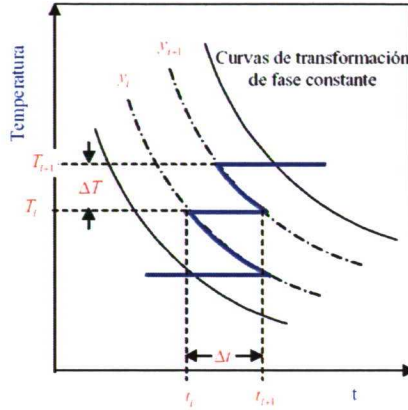


Figura 3.2: Las coordenadas inicial y final se unen por pasos isotermos intercalados con otros de fracción volúmica constante.

Primero se determinan las constantes  $b_k$  y  $n_k$  a la temperatura  $T_i$  a partir de los tiempos y fracciones volúmicas de comienzo ( $t_s, y_s$ ) y final ( $t_f, y_f$ ) de una transformación, siendo muy común considerar el inicio cuando el porcentaje de la nueva fase alcanzada es del 1 % y el 99 % para el final. Aunque otros autores [ASM 1991] emplean otros porcentajes.

$$n_k = \frac{\log [(1 - y_s) / (1 - y_f)]}{\log [t_s(T) / t_f(T)]} \quad (3.45)$$

$$b_k = \frac{-\ln (1 - y_s)}{[t_s(T)]^{n_k}}$$

En cada uno de estos pasos isotermos el cálculo del porcentaje de fase formado se realiza con la ecuación

$$y_{k,i} = 1 - \exp \{ -b_k (t'_i + \Delta t_i)^{n_k} \}$$

donde el tiempo  $t'_i$  se calcula a partir de la ecuación 3.44 para la concentración en el paso  $i - 1$  como

$$t'_i = \{ [-\ln (1 - y_{i-1}) / b_k] \}^{1/n_k} \quad (3.46)$$

En los ciclos térmicos se distinguen dos etapas: calentamiento y enfriamiento. Durante la etapa de calentamiento se aplica el método anterior sobre un diagrama ITh (ver figura 3.3) introduciendo la modificación de Ericson [SAAVEDRA 2004]:

$$y_{k,i} = (y_k)_{\max} [1 - \exp \{ -b_k t_i^{n_k} \}] \quad (3.47)$$

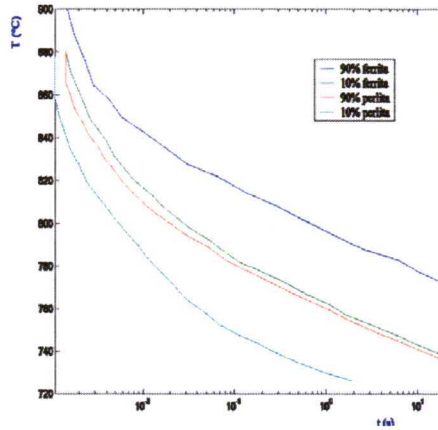


Figura 3.3: Diagramas ITh para el acero F114.

donde la constante  $(y_k)_{\max}$  representa la máxima fracción volúmica del constituyente  $k$  que se puede formar a una temperatura dada. La presencia de este término lleva implícito el principio de aditividad, esto es, la composición final de una fase será la suma de las fracciones parciales de cada transformación [ARCHAMBAULT 1997].

En la figura 3.4 se representa el ciclo térmico correspondiente a un punto, situado a una profundidad de 0.7 mm, perteneciente a una pieza cilíndrica de radio exterior de 20.5 mm y 12.5 mm de radio interior de acero F114, tratada con un haz láser de modo transversal TEM01\* y anchura 3 mm, 969W de potencia continua y con velocidad relativa de 10 mm s<sup>-1</sup>.

En la figura 3.5 se muestra una aplicación de este método.

Durante la fase de enfriamiento se modifica el modelo empleado para tener en cuenta la nucleación previa al crecimiento por difusión. En el proceso de descomposición de la austenita en perlita o bainita se distinguen dos etapas: germinación y crecimiento.

La germinación se puede modelizar por el principio de aditividad de Scheil [ASM 1991], [BRAZ 1985], [SAAVEDRA 2004]. Para cada paso se calcula la relación entre la longitud del intervalo temporal y el tiempo necesario para que se forme el 1 % de una componente en una transformación isoterma:

$$\sum \frac{\Delta t_i}{\tau(T_i)} \quad (3.48)$$

donde  $\Delta t_i$  representa el paso temporal y  $\tau(T_i)$  es el tiempo de incubación de la transformación isotérmica a la temperatura  $T_i$ . Cuando esta suma alcanza la unidad, el periodo de germinación queda finalizado, dando comienzo una nueva etapa.

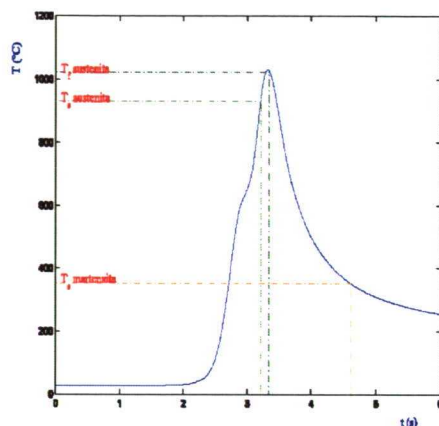


Figura 3.4: Evolución de la temperatura frente al tiempo a 0.7 mm de profundidad. Se indican las temperaturas de inicio y fin de la formación de martensita.

Durante la fase de crecimiento las transformaciones austenita→ferrita, austenita→perlita y austenita→bainita se cuantifican con la ecuación:

$$y_{k,i} = y_{aus} (y_k)_{\max} [1 - \exp \{-b_k t_i^{n_k}\}] \quad (3.49)$$

El término  $y_{aus}$  representa el porcentaje de austenita formada en el calentamiento.

Una vez cuantificadas las transformaciones por difusión, la fracción en volumen de martensita formada dependerá únicamente de la temperatura alcanzada por debajo de  $M_s$  (temperatura de comienzo de la formación de martensita. Ver figura 3.6) y vendrá dada por la ecuación de Koistinen-Marburger:

$$y_{martensita} = y_{aus} [1 - \exp \{\gamma (M_s - T_{fin})\}] \quad (3.50)$$

donde  $\gamma$  es un coeficiente que toma el valor 0.011 para aleaciones con contenidos de carbono entre un 0.37 % y un 1.1 % y  $T_{fin}$  representa la temperatura final del proceso.

En la gráfica 3.7 obtenida a partir del ciclo térmico de la figura 3.4 se muestra un resultado de esta aplicación.

### 3.3.2 Endurecimiento

Una vez finalizada la concentración de las diferentes fases correspondientes a cada ciclo térmico, se puede estimar la dureza alcanzada en cada punto de la pieza. Para esto se emplea un conjunto de ecuaciones empíricas que relacionan la dureza en Vickers (HV) con la composición del material, con la fracción de cada fase y con la velocidad



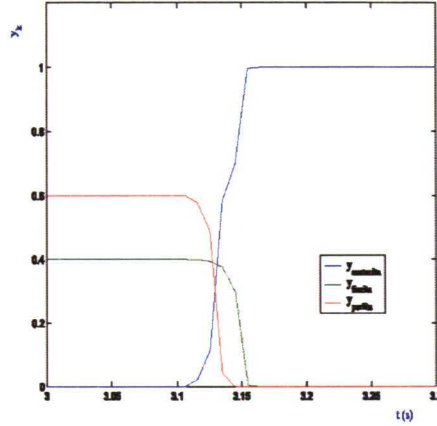


Figura 3.5: *Fracción volúmica de las diferentes fases frente al tiempo durante el calentamiento.*

de enfriamiento. Por ejemplo, para la martensita, la bainita y la fase ferrita+perlita se calculan según [DOANE 1977], [VICTOR 1998]:

$$\begin{aligned} Hv_m &= 127 + 949C + 11Mn + 21 \log(V_{fr}) \\ Hv_b &= -323 + 185C + 153Mn + (89 + 53C - 22Mn) \log(V_{fr}) \\ Hv_{f+p} &= 42 + 223C + 30Mn + 10 \log \log(V_{fr}) \end{aligned} \quad (3.51)$$

de tal modo que la dureza en cada punto de la pieza se puede calcular en función de los valores obtenidos con la ecuación 3.51 para cada una de las fases con la expresión:

$$HV = X_m Hv_m + X_b Hv_b + (X_f + X_p) Hv_{f+p} \quad (3.52)$$

donde  $HV$  representa el valor de dureza Vickers y  $Hv_i$  la de las diferentes fases,  $X_i$  representa la composición en tanto por uno de cada una de las fases,  $C$  y  $Mn$  son los tantos por cien de carbono y manganeso que están presentes en el acero y  $v_{fr}$  es la velocidad media de enfriamiento cuando la temperatura baja de 760 °C a 650 °C, medida en grados centígrados por hora.

La dispersión ( $2\sigma$ ) en los valores de  $HV$  es [DOANE 1977] de 13 Vickers para valores de la velocidad de enfriamiento entre 814 y  $1.5 \times 10^5$  °C/h.

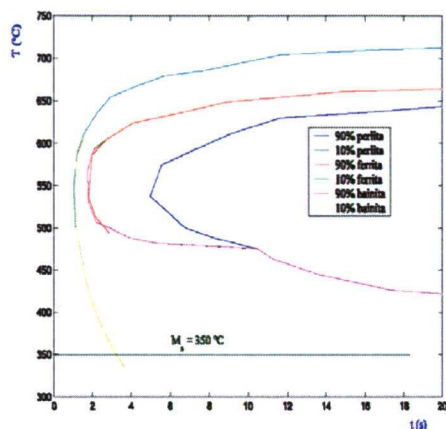


Figura 3.6: Diagrama TTT de enfriamiento isoterma para un acero F114.

### 3.4 Aplicación práctica al caso del endurecimiento del acero A420

Entre los datos que proporcionan los modelos de simulación de procesos destacan los que siguen.

- Determinación de la temperatura máxima.

Los modelos permiten calcular la temperatura máxima que se obtiene en la superficie. Este conocimiento es crucial en los procesos de temple para asegurar que nunca se va a alcanzar la temperatura de fusión que inutilizaría la pieza.

- Situación de determinadas isothermas.

Al proporcionar estos datos tanto en superficie como en profundidad, se puede determinar el conjunto de valores de parámetros válidos de tratamiento que van a permitir predecir el resultado, en términos de temperatura, dentro de un rango de valores. A partir de tener determinada la posible área de trabajo (rango de valores de los parámetros de proceso) se puede pasar a configurar el regulador del control automático para cada tipo de proceso, según se indica en 5.7.2.

- Anchura y profundidad fundida/templada.

De los resultados numéricos y de la distribución de isothermas para valores característicos (temperatura de fusión, temperatura de austenización, etc) también se puede

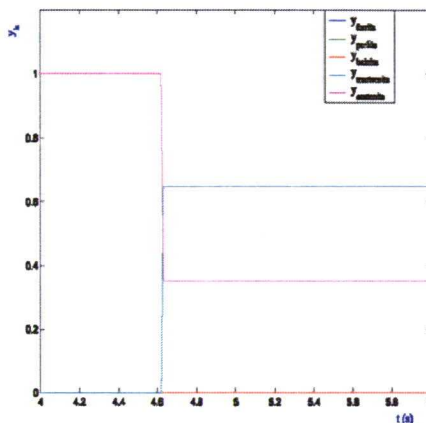


Figura 3.7: *Fracción volúmica de las diferentes fases frente al tiempo durante el enfriamiento.*

predecir el perfil de material fundido o el perfil de dureza que se puede esperar del tratamiento [SAAVEDRA 2004].

Para comprobar la ayuda que representa la simulación numérica del proceso de endurecimiento por laser, se ha realizado la resolución de la ecuación de transmisión de calor por dos métodos [SAAVEDRA 2004]: solución analítica y también por el código de elementos finitos ANSYS<sup>TM</sup>. El conocimiento de los ciclos térmicos permite elegir los parámetros de proceso mas adecuados con los que se pueda lograr un resultado que cumpla con las exigencias impuestas. Se van comparando con datos experimentales para comprobar la bondad de los resultados del modelo.

Se han llevado a cabo experimentos con acero inoxidable AISI 420 (tipo marten-sítico) ampliamente utilizado en componentes de máquinas (compresores y bombas de varias etapas) donde se exige buen comportamiento en cuanto a corrosión (por reacción con los líquidos bombeados, cavitación, etc.), resistencia al desgaste (por estrechas tolerancias de montaje) y fatiga (por esfuerzos mecánicos, vibraciones, etc).

### 3.4.1 Requisitos del tratamiento

Para poder alcanzar los objetivos comentados, la fabricación de estas piezas necesita realizar un tratamiento térmico superficial que permita alcanzar durezas por encima de 50 RC desde la superficie hasta una profundidad de 0,77 mm. Sin embargo, como el ancho de la superficie a tratar es mucho mayor que el máximo diámetro de haz disponible para alcanzar temperaturas de temple con un determinado equipo láser (por

la potencia máxima disponible en el resonador láser), se necesita realizar un recorrido en hélice, solapando las vueltas de modo que se consiga un tratamiento uniforme. En la figura 3.8 se muestra un esquema de las pasadas sucesivas con las siguientes zonas características:

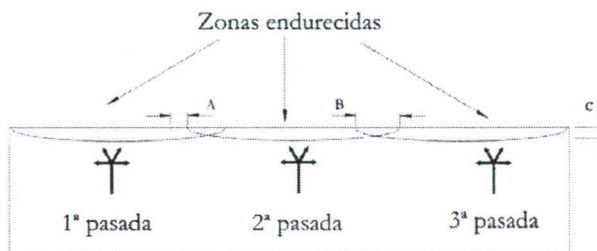


Figura 3.8: Esquema de pasada en espiral con solape.

- zona A: zona que vuelve a sufrir otro proceso de temple, posterior al inicial.
- zona B: ancho del solape entre vueltas consecutivas.
- zona C: profundidad de la zona templada.

Los requisitos de fabricación exigen una dureza de 50 RC tanto en la zona B de solape como en la profundidad antes indicada de 0,77 mm, admitiendo un valor de 42 RC en la zona A.

Las piezas son aros con un diámetro exterior de 129 mm, espesor de 10 mm y ancho de 20 mm. En la figura 3.9 se indican los ejes tomados en los modelos que más tarde se comentan.

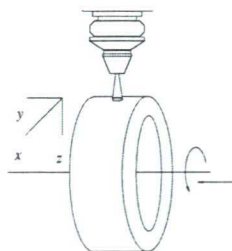


Figura 3.9: Disposición de los ejes de coordenadas.

En la tabla 3.4 se indican tanto las propiedades del material, como las características del haz láser y los valores de los parámetros de proceso.



Tabla 3.4: *Propiedades del material y parámetros del proceso.*

Propiedades del material	
Composición	C (0.15 %), Mn (1 %), Si (1 %), Cr (12-14 %)
Coefficiente de absorción	0.68
Conductividad térmica ( $W/(m\ K)$ )	24.90
Difusividad térmica ( $m^2/s$ )	$0.694 \times 10^{-5}$
Características del haz	
Modo	TEM01*
Ancho del haz (mm)	5.00
Velocidad relativa láser-pieza (mm/s)	6.00
Parámetros del proceso	
Tiempo total del proceso (s)	240
Temperatura inicial (K)	300
Paso de la hélice (mm/vuelta)	6.50
tiempo por vuelta (s)	67.55

### 3.4.2 Modelo analítico

El modelo analítico proporciona una descripción del campo de temperaturas dependiente del tiempo inducido por la radiación incidente del láser sobre la superficie de la pieza y en profundidad, partiendo de la resolución de la ecuación de conducción de calor para una fuente dependiente del tiempo y del espacio [YAÑEZ 2003].

Para una geometría plana la resolución de esta ecuación, imponiendo determinadas condiciones de contorno, se resuelve por el método de las imágenes. La necesidad teórica de infinitas imágenes se salva porque, a medida que se distancian más de la superficie donde incide el haz, la importancia de su efecto disminuye drásticamente, siendo suficiente con un pequeño número de ellas para asegurar una buena aproximación a la solución real.

En el caso de la geometría cilíndrica que nos ocupa, se deben hacer las siguientes simplificaciones: Dada la proporción entre el espesor  $h$  y el radio exterior  $R$  ( $h \ll R$ ), se considera el anillo como una placa de espesor  $h$  y largo  $2\pi R$ , considerando que tiene dos bordes no adiabáticos situados en  $x = 0$  y  $x = 2\pi R$  con un campo de temperaturas periódico con un periodo de  $2\pi R$

$$T(x, y, z, t) = T(x + 2\pi R, y, z, t)$$

Estos bordes no adiabáticos, se conectan entre sí de modo que el flujo saliente en  $x = 0$  es el flujo entrante en  $x = 2\pi R$ . Este efecto se alcanza añadiendo fuentes en la dirección  $x$  con periodo  $2\pi R$ .

### 3.4.3 Modelo numérico (FEM)

El modelo de elementos finitos utilizado [YAÑEZ 2003][SAAVEDRA 2004] usa el código ANSYS<sup>TM</sup>. El modelo incluye propiedades del material dependientes de la temperatura y la evolución temporal de las condiciones de contorno, que son introducidas con ayuda de un programa externo en código Fortran.

Al definir el modelo se tiene en cuenta determinados aspectos que pueden influir en la fiabilidad de los resultados obtenidos como son el tamaño del elemento elegido y su forma, la forma de discretizar el flujo de energía a partir de la expresión matemática de la distribución de energía para un haz TEM<sub>01</sub>\*, el tiempo total del tratamiento y el paso de tiempo utilizado.

Se analiza, previamente, el efecto del tamaño del elemento sobre el error del resultado, comparando las temperaturas finales calculadas de una probeta en forma de paralelepípedo de dimensiones 32 mm × 32 mm × 16 mm, al ir variando el tamaño del elemento. Relacionando la diferencia de temperaturas respecto a la teórica  $\Delta T$ , frente al incremento del tamaño de la celda  $\Delta x$ , se concluye que el error en temperatura tiende a disminuir a medida que disminuye  $\Delta x$ , sin embargo este error no se mejora mucho cuando el tamaño disminuye por debajo de 0.8 mm. Por tanto, bajar de la dimensión indicada no lleva ninguna mejora notable con la contrapartida de que el tiempo de cálculo se eleva exponencialmente al hacerlo el número de nodos.

Con las mismas dimensiones se evalúan los  $\Delta T$  para diferentes valores del paso temporal, encontrando que, aunque disminuyen al disminuir el paso, no mejora sustancialmente por debajo de 0.01 s, tiempo para el que se obtiene un error de 10 K para una temperatura final de 400 K.

Otro aspecto a tener en cuenta es la relación de aspecto de las celdas. Para optimizar la malla se utilizan celdas paralelepédicas en vez de cúbicas. Esto disminuye el número de celdas necesarias pero presenta el inconveniente que, aunque se comporta bien con problemas isotrópicos, este caso presenta carácter altamente no isotrópico debido a que la entrada del flujo de energía (condición de contorno) es totalmente unidimensional, presentando un fuerte gradiente de temperaturas en esa dirección, por eso el error aumenta inversamente proporcional a la relación de aspecto (cuanto menos se parece a la forma cúbica, mayor error se arrastra). De todos modos se puede salvar en gran parte este inconveniente aumentando el número de nodos por unidad de longitud en la dirección del recorrido del haz.

Otro aspecto de interés es que para discretizar correctamente la distribución de energía del haz y lograr con ello un error de 10 K para una temperatura de 400 K, el ancho del haz debe ser al menos 8 veces el espaciado entre nodos.

### 3.4.4 Tratamiento de la pieza cilíndrica

Al procesar un aro, el recorrido que se realice debe asegurar la uniformidad del tratamiento. Una vez elegida la hélice como método mas apropiado, fijado un diámetro de haz, potencia del haz y velocidad relativa haz-pieza, el único parámetro que falta definir es el avance en la dirección  $Y$  (ver figura 3.9) por cada vuelta, que es lo que va a determinar el solape entre vueltas sucesivas y que va a permitir alcanzar la uniformidad deseada.

A medida que el haz recorre la pieza, si la potencia se mantiene constante, provoca el endurecimiento de la superficie de la pieza pero también la elevación progresiva de la temperatura de toda la pieza, como se aprecia en la figura 3.10 izquierda, donde se representa la evolución de la temperatura calculada con el modelo.

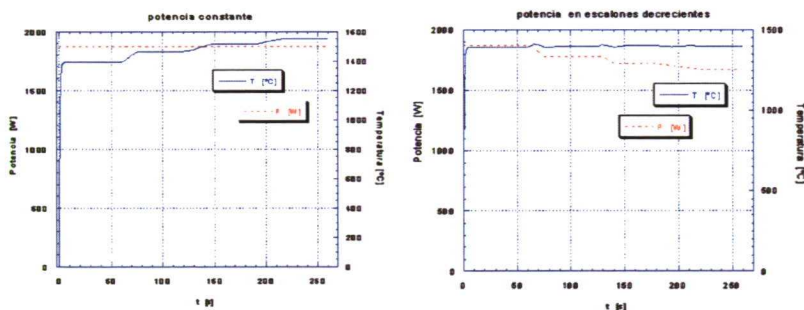


Figura 3.10: Evolución de la temperatura para potencia constante (izquierda) y escalones decrecientes (derecha).

Este problema se puede corregir introduciendo una potencia que vaya disminuyendo progresivamente a cada vuelta, función que se puede obtener de los cálculos con el modelo hasta obtener unos datos de potencia en escalones como los de las líneas discontinuas de la misma figura 3.10 derecha. El modelo nos permite determinar la rampa exacta de potencia para conseguir mantener la temperatura constante. Luego, dependiendo de las posibilidades que admita el armario de control del láser se podrá o no introducir esta función de variación de potencia tal y como se obtiene del modelo.

En la figura 3.11 refleja la medida experimental efectuada durante un tratamiento realizado a potencia constante donde se ve que la evolución de la temperatura es similar a la calculada con el modelo, incrementándose en cada vuelta (cada 65 s). En el tramo central se aprecian unas oscilaciones debidas a que se alcanza la temperatura de fusión



del material del aro ( $1450 \div 1550$  °C) y el último tramo tiene lugar con clara fusión de la superficie del material. De realizar así este tratamiento nos inutilizaría la pieza para su uso posterior.

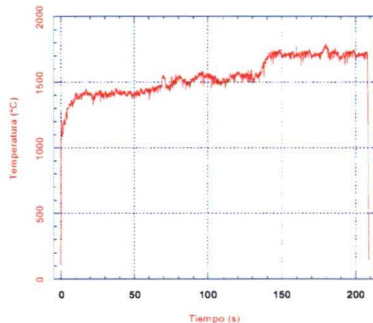


Figura 3.11: *Evolución de la temperatura con potencia constante.*

Pero si se observan en detalle las figuras 3.10 y la 3.11, los incrementos mas importantes de temperatura tienen lugar cuando se está próximo a completar cada vuelta, que es cuando el láser se va acercando a una superficie que ya ha sido tratada pero que todavía mantiene una temperatura relativamente elevada (sobre 150 °C) lo que provoca que, al recibir nuevo aporte de energía, alcance una temperatura mayor que si partiera de la temperatura ambiente. Así, en vez de disminuir la potencia de forma continua, podemos limitar esas variaciones a ir disminuyendo la potencia en escalones en cada vuelta y uniendo esos escalones con unas rampas de modo que el resultado sea una temperatura bastante uniforme.

Casi todos los láseres industriales permiten programar rampas de potencia de modo que con esto se solucionaría el problema. La única limitación es el número máximo de rampas que se pueden programar en un determinado equipo. En el caso particular que nos ocupa, donde era necesario completar 3 vueltas, eran necesarios tres escalones con las dos rampas intermedias que harían un total de 5 pasos y en el control del láser tenemos como límite 7 rampas con lo que es más que suficiente.

Con el modelo se pueden calcular las rampas de potencia adecuadas que resultan ser (en tantos por cien de la potencia máxima): 83 % durante 60 s, rampa de bajada hasta 80.7 % en 15 s (coincide con ir acabando la primera vuelta y comenzando la segunda), mantenimiento del 80.7 % durante 50 s, rampa de bajada hasta 78 % en 20 s (coincide con ir acabando la segunda vuelta y comenzando la tercera), mantenimiento del 78 % durante 40 s, rampa de bajada hasta 76.2 % en 40 s (coincide con ir acabando la tercera vuelta y comenzando la cuarta) y mantenimiento del 76.2 % durante los últimos



40 s. Se hace notar que a medida que transcurren las vueltas y la temperatura media del aro va en aumento, se hace necesario adelantar el momento en que se reduce la potencia respecto del punto donde se completan las vueltas, para seguir manteniendo la temperatura constante.

En la figura 3.12 se muestran los resultados de las medidas experimentales, donde se puede comprobar que la temperatura ya no tiene la tendencia a subir que presentaba cuando se realizaba a potencia constante y se mantiene razonablemente estable entre 1250 °C y 1400 °C.

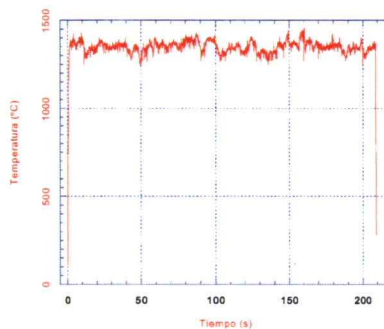


Figura 3.12: *Evolución de la temperatura con potencia en escalones decrecientes.*

En caso de que la pieza fuera mas ancha y necesitara mayor número de vueltas y por tanto mayor número de rampas a definir, nos veríamos limitados por las capacidades de programación del control del láser. Estos casos justificarían la necesidad de desarrollar un sistema de control en tiempo real capaz de ir variando la potencia de acuerdo a la evolución de la temperatura de la superficie de la pieza en cada instante.

Pero mantener la uniformidad en la temperatura no basta para asegurar los requisitos del tratamiento térmico deseado. Es aquí donde los modelos nos pueden aportar más información de interés.

Una vez determinados los parámetros del tratamiento que vamos a aplicar podemos realizar diferentes simulaciones con el modelo para obtener mas información sobre lo que está ocurriendo en el material.

En primer lugar podemos determinar el ciclo térmico que tiene lugar en un punto del material cuando el láser pasa por encima (figura 3.13) o la evolución de la temperatura de ese punto a lo largo de todo el tratamiento, donde se observa el efecto de las sucesivas pasadas del láser en las diferentes vueltas.

El conocimiento de los ciclos térmicos nos permiten determinar qué puntos del material son templados y no recocidos en pasadas posteriores. Se pueden determinar

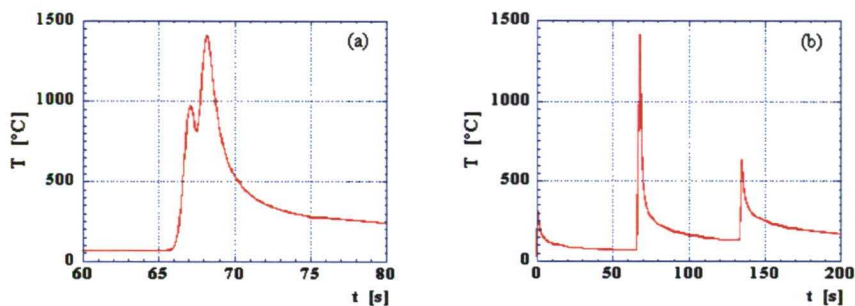


Figura 3.13: Evolución de la temperatura de un punto. (a) en un solo ciclo ; (b) en todo el proceso.

el ancho y la profundidad de las isothermas características  $Ac1 = 980^{\circ}\text{C}$  (temperatura donde comienza la formación de la austenita) y  $Ac3 = 1065^{\circ}\text{C}$  (temperatura correspondiente al 100 % de concentración de martensita), que se muestran en la figura 3.14. Se puede apreciar la homogeneidad que se puede obtener en ambos parámetros gracias a la aplicación de la potencia en escalones decrecientes.

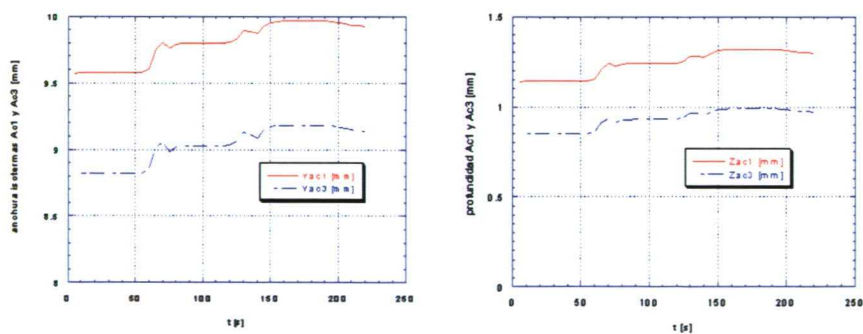


Figura 3.14: Evolución del ancho y la profundidad de las isothermas  $Ac1$  ( $980^{\circ}\text{C}$ ) y  $Ac3$  ( $1065^{\circ}\text{C}$ ).

Estos resultados se han obtenido usando el código de elementos finitos ANSYS. El modelo analítico es mas rápido cuando se calcula la evolución de un pequeño número de puntos pero es mas lento a medida que el número de puntos se incrementa porque el tiempo de cálculo es proporcional a ese número. En un tratamiento como el hasta

aquí presentado para una potencia de 1900 W, con una malla de 32.000 nodos y 4.000 pasos de tiempo, el error absoluto en la temperatura es menor de 50 K.

En la figura 3.15 se muestra la evolución de la temperatura en profundidad para puntos con las mismas coordenadas  $x$  e  $y$ . En ella se puede apreciar que para puntos situados a la profundidad de 1 mm se alcanzan unas temperaturas máximas por encima de las correspondientes a  $Ac1$  y  $Ac3$ , con lo que el endurecimiento está asegurado hasta esta profundidad.

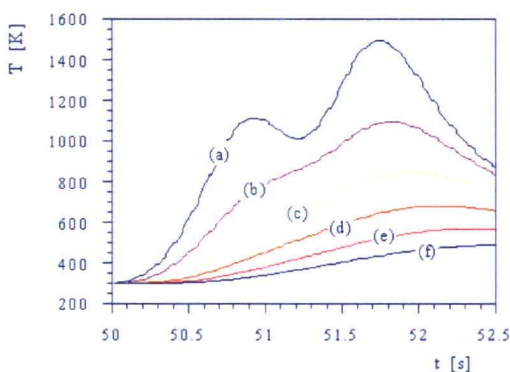


Figura 3.15: Ciclos térmicos para puntos de las mismas coordenadas  $(x, y)$  a diferentes profundidades. a)  $z = 1$  mm; b)  $z = 2$  mm; c)  $z = 3$  mm d)  $z = 4$  mm. d)  $z = 5$  mm e)  $z = 6$  mm.

Los resultados experimentales del proceso, cuya secuencia se ilustra en la figura 3.17, con mediciones de la dureza real obtenida (ver figura 3.16), confirman los resultados predichos por la simulaciones con modelos. Se logran las durezas requeridas en la página 90, tanto en las zonas de solape entre vueltas sucesivas (I) como en el centro de la zona tratada en cada vuelta (II).

### 3.4.5 Conclusiones

La combinación de las técnicas analítica y numérica supone una importante ayuda para determinar los parámetros del proceso adecuados para lograr una modificación de las propiedades del acero inoxidable de acuerdo a las exigencias derivadas de determinadas condiciones de su uso posterior al formar parte de una máquina.

El poder determinar con los modelos el solape adecuado, así como los escalones de potencia decrecientes necesarios para compensar la tendencia a una temperatura

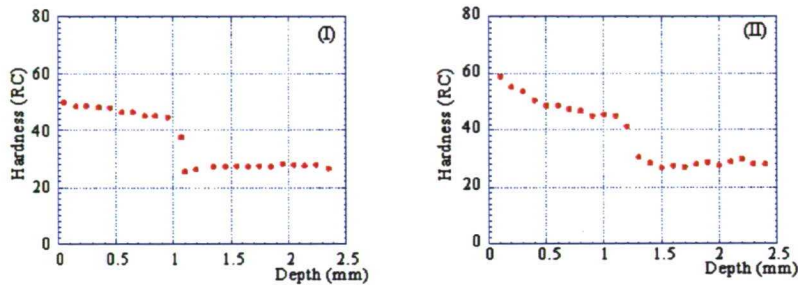


Figura 3.16: Dureza medida para un punto situado en: (I) zona de solape B; (II) zona correspondiente al centro de la segunda vuelta.

creciente en vueltas sucesivas, permiten ahorrar la que de otra manera sería una tediosa labor experimental de determinación sistemática de parámetros, llevando a cabo un gran número de tratamientos y analizando los resultados obtenidos en cada uno de ellos. Esta serie de experimentos necesitaría, aparte de un gasto mucho mayor de material para probetas, un gasto en tiempo de pruebas y posteriores análisis de resultados muy superior al empleado en las simulaciones con modelos.

Así como el modelo analítico ayuda a conocer lo que está pasando, gracias a su rapidez, los cálculos mediante el FEM permite introducir mejoras (como son los valores de las propiedades del material dependientes de la temperatura) que proporcionan cálculos mas precisos.

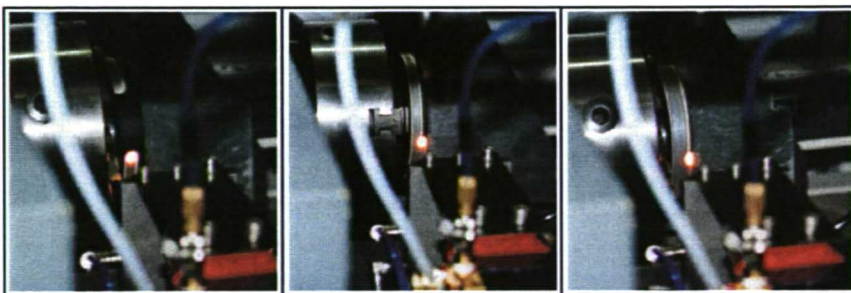


Figura 3.17: Secuencia del proceso de tratamiento.

Por lo hasta ahora visto, manteniendo la máxima temperatura superficial en un va-



lor constante se garantiza un buen grado de homogeneidad en los resultados obtenidos. Aunque por si sola la uniformidad de la temperatura no garantiza lo que está pasando en el material, las simulaciones con los modelos sí permiten afirmar que para un determinado conjunto de parámetros (velocidad haz láser-pieza, ancho del haz, solape entre vueltas) si se mantiene la temperatura superficial constante y de un determinado valor, el resultado del tratamiento es predecible y repetible.

A los efectos de esta tesis concluimos que la temperatura superficial es una magnitud que está íntimamente relacionada con lo que está ocurriendo en el material durante el proceso de tratamiento térmico y por tanto la podemos elegir como variable de control. Actuando en el sistema láser, variando la energía aportada en cada instante, trataremos de mantener esa temperatura en un valor determinado y lo más constante posible.

La utilización de los modelos aportan información precisa que puede ayudar a comprender mejor lo que está sucediendo durante el proceso y permite tomar decisiones de cara a implantar un sistema de control en tiempo real mas fiable.

## Capítulo 4

# Instrumentación desarrollada en laboratorio propio

### 4.1 Sistemas en tiempo real para un sistema de control

#### 4.1.1 Introducción

En la actualidad la mayoría de los sistemas de control se implantan digitalmente, mediante un microprocesador u ordenador, debido a las numerosas ventajas [MUÑOZ 2002] que aportan este tipo de sistemas, entre las que se pueden destacar:

- *Flexibilidad.*- Al implantar el algoritmo de control como un programa, es mas fácil realizar cambios que cuando se implanta directamente en hardware.
- *Complejidad.*- Mediante un controlador analógico basado en hardware sólo se pueden implantar controladores sencillos (p. ej. un PI ó un PID). Sin embargo, mediante ordenador y /o microprocesador pueden implantarse controladores desde los mas simples a los mas elaborados, como por ejemplo controladores adaptativos o no lineales.
- *Inmunidad.*- Tanto a los ruidos como a envejecimiento de componentes, variaciones de temperatura, etc.

En la figura 4.1 se muestra un diagrama de bloques simplificado de un sistema de control digital. Como se puede observar, se toman unas medidas de magnitudes relacionadas con el proceso industrial que nos interesa. En la práctica un pirómetro nos permite medir la temperatura superficial. Mediante un conversor analógico-digital se convierten una o varias medidas del proceso a controlar. En la práctica esta tarea será realizada por una tarjeta de entrada-salida de datos. A partir de esas medidas,

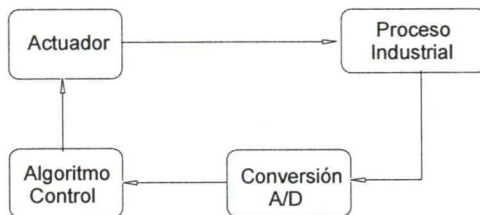


Figura 4.1: *Diagrama de bloques de un sistema de control digital.*

utilizando un algoritmo de control, se calcula la entrada que es necesaria aplicar al proceso para lograr determinado fin, que se aplica mediante un actuador. En este caso se realiza mandando una consigna de potencia externa al láser a través del control numérico que nos acciona -a su vez- el movimiento de la probeta por debajo del haz. El proceso completo de medida, cálculo y actuación tarda un determinado tiempo en completarse, que con la tecnología actual está en el rango de cientos de microsegundos. Precisamente aquí radica la principal desventaja de los sistemas de control digitales frente a los analógicos, ya que en estos últimos el proceso anterior es en la práctica instantáneo, entendido como continuo. Por lo tanto, mientras que los sistemas analógicos se diseñan utilizando técnicas de control en tiempo continuo, los digitales han de diseñarse usando técnicas de control en tiempo discreto, en las cuales se parte de que la salida del sistema de control no cambia de modo continuo, sino que cambia a intervalos regulares de tiempo  $T_s$ , denominado periodo de muestreo. Por tanto el sistema de control digital ha de ser capaz de realizar siempre todo el proceso mostrado en la figura 4.1 cada  $T_s$ , pues de lo contrario la planta se quedará en bucle abierto, lo que puede tener consecuencias catastróficas.

#### 4.1.2 Necesidades temporales para distintos sistemas

Cada sistema informático ha de cumplir una serie de restricciones temporales para que su funcionamiento sea aceptable. Un sistema de edición de textos, ha de responder "suficientemente rápido" al usuario. En este caso, aunque cada 10 minutos el sistema deje de responder al usuario durante unos pocos segundos mientras está guardando una copia de seguridad del texto al disco, el comportamiento del sistema se considera correcto. En cambio, en aplicaciones multimedia existen restricciones temporales mas severas. Si se trata de un sistema de reproducción de video, cada 20 ms ha de aparecer un nuevo cuadro en la pantalla. Si, ocasionalmente se pierde un cuadro, no pasa nada aparte de una pequeña congelación de la imagen, que aunque incómoda normalmente

no supone una catástrofe. Pero si un sistema informático controla un robot, unos pocos milisegundos sin realizar el algoritmo de control puede tener consecuencias desastrosas. En este último caso, el sistema debe garantizar los tiempos de respuesta para que el algoritmo de control se ejecute completamente cada periodo de muestreo  $T_s$ .

#### 4.1.3 Definición de un sistema en tiempo real

Un sistema informático en tiempo real es aquel en que la corrección el resultado depende tanto de su validez lógica como del instante en que se produce.

En definitiva, un sistema en tiempo real no sólo necesita determinada velocidad de ejecución sino también determinismo. Es decir, el tiempo de ejecución de las tareas en tiempo real ha de estar acotado en el caso mas desfavorable y dicha cota ha de ser inferior al periodo de ejecución de dicha tarea ( $T_s$  para un sistema de control). Esto es difícil de asegurar en sistemas que corren bajo sistema operativo Windows®. En estos sistemas el procesador debe atender, aparte las llamadas e interrupciones del programa de control, multitud de llamadas periódicas y/o aleatorias desde otros periféricos (teclado, ratón, refresco de la memoria de pantalla, etc.) con lo que es difícil asegurar un tiempo de ejecución exacto.

Conviene destacar que un sistema de control puede no necesitar una máquina muy potente si la planta es lenta, como ocurre en general en sistemas de control de temperatura con tiempos de respuesta del orden de segundos o minutos incluso. Es decir, tiempo real no es sinónimo de rapidez sino de determinismo en el tiempo de respuesta. Conviene por tanto estudiar el tiempo característico del proceso a controlar para determinar el periodo de muestreo adecuado y la adecuación del sistema informático a las necesidades reales.

#### 4.1.4 Alternativas para implantar un sistema en tiempo real

Hay diversas alternativas para implantar un sistema en tiempo real. Si el sistema se va a implantar en un microprocesador dedicado, se puede realizar una programación a medida usando técnicas de tiempo real [AUSLANDER 1996]. En este caso el método mas común consiste en realizar un bucle sin fin en el que cada periodo de muestreo se miden las entradas, se ejecuta el algoritmo de control y se actualizan las salidas, quedando el programa a la espera del siguiente periodo de muestreo.

La técnica anterior puede ser apropiada para sistemas en los que el microprocesador se dedica exclusivamente a controlar el sistema, pero no es aplicable cuando el microprocesador ha de realizar otras tareas, como por ejemplo comunicaciones, interfaz hombre-máquina, gestión de periféricos, etc. En estos casos, cada vez mas comunes hoy en día, se hace imprescindible el uso de un sistema operativo que se encargue de



la gestión del sistema. Sin embargo, tal y como se ha expuesto anteriormente, ha de usarse un sistema operativo de tiempo real que garantice el tiempo de respuesta máximo de las tareas de control, compatibles con el tiempo característico del sistema a controlar. Existen varias opciones en el mercado, pero se pueden agrupar en dos tipos:

- *Escritos desde cero*, es decir, no se basan en ningún sistema operativo previo y por tanto han de escribirse desde el núcleo y todos los controladores de dispositivos e interfaces con el exterior desde cero. Esto implica que desarrollar este tipo de sistemas es caro y además no tienen una base amplia de usuarios por lo que no están suficientemente probados y no soportan la amplia gama de dispositivos de un sistema operativo de propósito general. Como ventaja principal se debe destacar su bajo consumo de memoria y recursos. Ejemplos de este tipo son los sistemas operativos VxWorks, QNX, etc.
- *Basados en sistemas operativos de propósito general*. En estos casos, se hace convivir en una misma máquina un sistema operativo de tiempo real básico con un sistema operativo de propósito general. Las principales ventajas de estos sistemas es su robustez, al partir de sistemas operativos ampliamente probados, su amplio soporte de dispositivos y su bajo coste. El principal inconveniente es un mayor consumo de recursos y memoria y un menor número de arquitecturas soportadas. Ejemplos de este tipo de sistemas son RT-Linux, e INtime (para windows NT, 2000 y XP).

En el caso de un sistema lo suficientemente lento, se puede utilizar bajo sistema operativo Windows 98, Millenium o XP, teniendo presente que se deben hacer pruebas previas reales para comprobar el tiempo máximo de ejecución de tareas del programa de control, para asegurarse que siempre va a ser inferior al periodo de muestreo que se considere adecuado, antes de intentar realizar ningún control sobre el sistema real.

#### 4.1.5 Elección de la variable de control

En [RÖMER 1999] se comentan diferentes técnicas que se pueden utilizar para tener información sobre los cambios que están ocurriendo en la estructura de una pieza mientras está sufriendo un tratamiento térmico por láser y se comentan las ventajas e inconvenientes de cada una. Para los trabajos de esta tesis, se eligió entre todas ellas la temperatura superficial dado que en el apartado 3.4.5 se concluyó la relación entre la temperatura superficial y los ciclos térmicos en el volumen de la pieza bajo tratamiento.

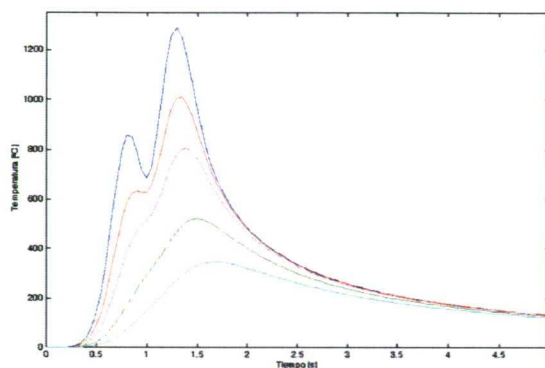


Figura 4.2: Ciclo térmico de puntos situados a diferente profundidad. La curva mas elevada corresponde a la superficie.

También se ha destacado que la posición del punto más caliente de la superficie (ver apartado 3.2 y siguientes) varía dependiendo del perfil de distribución de energía del haz láser y de la velocidad relativa haz-pieza. La evolución de la temperatura para un haz con una distribución transversal TEM01\* (como el que se muestra en la página 20) es como la de la figura 4.2 que presenta dos máximos, siendo el segundo mayor que el primero, mientras que para un haz gaussiano la evolución de las temperaturas sólo presenta un máximo, también con un cierto retraso respecto al centro del haz .

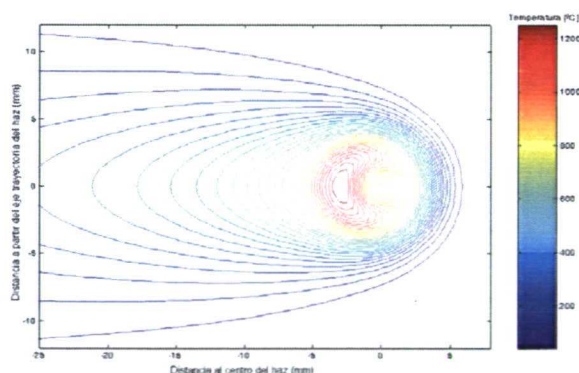


Figura 4.3: Distribución de temperaturas en la superficie.

Así para una anchura de haz de 3.5 mm y velocidad de  $10 \text{ mm s}^{-1}$ , el punto más caliente está situado a 3 mm por detrás del centro del haz como se puede ver en la figura

4.3, resultado de una simulación numérica. Si aumentamos la velocidad a  $15 \text{ mm s}^{-1}$  el punto más caliente se encuentra a 4.5 mm del centro del haz. Esto se debe tener en cuenta si se piensa utilizar el punto más caliente como referencia para asegurar que en ningún momento se alcanza la temperatura de fusión del material bajo tratamiento que, de alcanzarse, inutilizaría la pieza con el coste asociado correspondiente.

Si se eligiera la velocidad como variable de control correríamos el riesgo de que como al actuar sobre la velocidad se varía la situación del punto más caliente sobre la superficie de la pieza bajo tratamiento, la lectura dada por el pirómetro no es la correspondiente al punto más caliente. Al aumentar la velocidad el punto se retrasaría mas, provocando una lectura menor que la correspondiente al punto más caliente. Esto podría provocar que llegáramos a la fusión en algunos momentos del tratamiento inutilizando la pieza, con el consiguiente coste asociado.

Por estas razones se considera más adecuado optar por la variación de la potencia entregada por el láser como variable de control. Sin embargo esta elección no está totalmente exenta de problemas y que en el apartado 4.5.3 se verá la influencia de las variaciones de potencia sobre la situación del punto más caliente de la superficie.

## 4.2 Termometría infrarroja

### 4.2.1 Introducción

En el campo de la física aplicada, una de las variables más utilizadas para la caracterización de muchos fenómenos es la temperatura. Considerando la temperatura como la propiedad que nos determina si un sistema está en equilibrio térmico con otros sistemas, la medida práctica de esta variable entraña una serie de dificultades, ya que no es posible su medida directa, sino a través de alguna otra variable relacionada con ella.

De este modo, la termometría convencional se basa en la transmisión de calor por conducción cuando dos cuerpos (el objeto a medir y el termómetro) son puestos en contacto. Una vez que se alcanza la situación de equilibrio térmico se aprovecha otra variable física para la realización de la medida; ya sea el volumen en un termómetro de mercurio, la diferencia de potencial en un termopar o la resistividad en una termorresistencia.

Las características de la instrumentación apropiada para la monitorización del proceso de temple o soldadura por láser ha sido objeto de numerosos y muy detallados estudios por diferentes autores: [AMENDE 1984], [BERGMANN 1988], [BIELE 1988], [HERRERO 1997], [RÖMER 1999], [BERTRAND 2000] mostrando que todos aquellos medios basados en la detección de la radiación emitida por la superficie (como señal que se



puede relacionar con la temperatura de la superficie) resultan óptimos para su aplicación en la regulación y control del proceso.

Otros métodos para medir temperaturas, como los dispositivos matriciales CCD (Charged-Coupled Devices), fotodiodos en el espectro del infrarrojo y los pirómetros de radiación, presentan diferentes ventajas e inconvenientes en caso de utilizarse en sistemas de control en tiempo real. Estos condicionantes han de ser considerados en el diseño del sistema de regulación automática que se persigue.

Los fotodiodos constituyen la solución mas económica y sencilla. Aunque permanentemente salen al mercado nuevos diseños con rango de medida mas amplio, siguen teniendo el gran problema de que se suele necesitar mas de uno para poder correlacionar las medidas obtenidas y tienen el gran problema de focalizarlos en un área determinada<sup>1</sup> y sobre todo que su proceso de calibración son complejos [KECHEMAIR 1989].

Los dispositivos CCD [RÖMER 1999], como las cámaras térmicas, tienen la ventaja de que permiten obtener un completo mapa de la temperatura superficial y son útiles para procesar a posteriori los datos obtenidos. Dada la gran cantidad de información suministrada por estos sistemas, su tratamiento en tiempo real implica el uso de procesadores de muy gran capacidad o de control distribuido, de mayor dificultad de integración con el resto del sistema de control.

Para el trabajo propuesto en esta tesis se eligió emplear un pirómetro de radiación. Este dispositivo está constituido por un sensor de radiación, un sistema óptico de enfoque y un ocular que permite apuntar al punto de la superficie que nos interese en cada caso (en la página 121 se describe un sistema de apunte mejorado que facilita el trabajo experimental). Este sistema compacto, encerrado en una caja rugerizada utilizable en cualquier ambiente industrial (ver características técnicas en Anexo A), ofrece como salida una señal eléctrica directamente proporcional a la radiación espectral recibida y, por lo tanto, directamente proporcional a la temperatura de la superficie que está siendo procesada que, como hemos visto en el capítulo 3, está íntimamente relacionada con el ciclo térmico que está siguiendo el resto del material.

La termografía infrarroja utiliza la transmisión de calor por radiación como variable relacionada con la temperatura, por lo que no es necesario el contacto físico con el elemento a medir ni un tiempo de estabilización de temperaturas (por tener tiempos de respuesta del orden de decenas de milisegundos), permitiendo la realización de medidas en situaciones donde no sería posible el uso de termómetros convencionales, contando con las ventajas de mayor rapidez y seguridad del propio equipo.

A pesar de ser una técnica relativamente moderna (su introducción comercial se inició a principios de los años 60), la termografía infrarroja se encuentra lo bastante

<sup>1</sup>Aunque existan en el mercado modelos con lentes acopladas, sus prestaciones son bastante limitadas.



desarrollada actualmente como para permitir la captación en tiempo real de una medida eléctrica proporcional a la temperatura de un punto o una región de la superficie de un cuerpo o, con la composición de sensores adecuada en array, obtener una verdadera imagen térmica de la distribución de la temperatura superficial en niveles de gris o en colores.

Estas características hacen que la termografía infrarroja sea considerada como una herramienta de gran utilidad para un amplio campo de aplicaciones industriales y de investigación.

El fenómeno físico en que se basa la pirometría de radiación es la emisión de radiación térmica por parte de cuerpos calientes. Dado que la interacción del haz láser materia en los procesos de temple tiene lugar en la banda infrarroja, la radiación emitida por la superficie es una magnitud física idónea para correlacionar con la temperatura superficial del cuerpo bajo tratamiento. La radiación, en el sentido más general, consiste en la transmisión de energía en forma de onda electromagnética, que se transmite a la velocidad de la luz en el vacío y es capaz de interactuar con los distintos medios físicos en función de las propiedades del medio y de la propia longitud de onda de la radiación (según se vió en página 22 y siguientes).

Como ya se vió en el capítulo 1, la longitud de onda es el parámetro más característico de cualquier radiación electromagnética, ya que está relacionado con la naturaleza de dicha radiación como con los efectos que esta produce o la forma en que es percibida.

De este modo el espectro electromagnético está dividido en regiones, delimitadas en función de la longitud de onda, si bien cabe destacar que no son zonas claramente diferenciadas sino que se solapan entre ellas. Así, en el espectro infrarrojo, se extiende desde el límite del rango visible (rojo) hasta llegar a la región de las microondas, y constituye la zona de trabajo de la termografía por ser la banda en la que se produce la radiación térmica de los objetos a temperaturas relativamente bajas. Con la suficiente temperatura también se llega a emitir luz visible como en el caso de las estrellas.

Así se consideran ciertas bandas espectrales dentro del infrarrojo, como son el IR próximo ( $\lambda$  entre  $0,75 \mu\text{m}$  a  $1,5 \mu\text{m}$ ), IR medio ( $\lambda$  entre  $1,5 \mu\text{m}$  a  $20 \mu\text{m}$ ) y el IR lejano ( $\lambda$  entre  $20 \mu\text{m}$  a  $1000 \mu\text{m}$ ).

#### 4.2.2 Radiación térmica

Desde que el físico inglés William Herschel descubrió en 1800 [HALLIDAY 1993] la existencia de radiación de origen térmico más allá del espectro visible, los científicos han tratado de explicar la distribución espectral de esta energía y su relación con la temperatura. Las tres leyes fundamentales sobre las que se apoya la teoría moderna de la radiación son la Ley de Planck, la Ley de desplazamiento de Wien y la Ley de

Stefan-Boltzman.

### Ley de Planck

Max Planck estableció la distribución de radiación de energías para distintas temperaturas en función de la longitud de onda. Esta ley es válida para superficies emisivas con las características propias del cuerpo negro o emisor ideal. Viene dada por la expresión 4.1, en función de la longitud de onda  $\lambda$  y la temperatura de la superficie  $T$ ,

$$W_{\lambda_b} = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5 (e^{hc/\lambda kT} - 1)} \times 10^{-6} \quad [\text{W m}^{-2} \mu\text{m}^{-1}] \quad (4.1)$$

siendo:

$W_{\lambda_b}$ : radiación espectral del cuerpo negro a la longitud de onda  $\lambda$

$c$ : velocidad de la luz =  $3 \times 10^8 \text{ m s}^{-1}$

$h$ : constante e Planck =  $6.6260755 \times 10^{-34} \text{ J s}$

$k$ : constante de Boltzmann =  $1.3806568 \times 10^{-23} \text{ J K}^{-1}$

$T$ : temperatura absoluta del cuerpo negro

$\lambda$ : longitud de onda

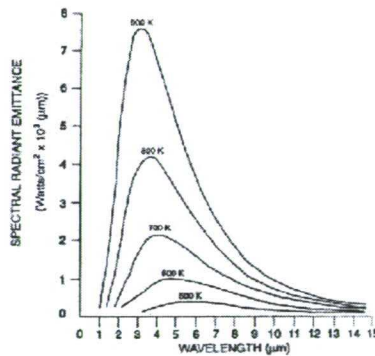


Figura 4.4: Ley de Planck. Radiación espectral del cuerpo negro para diferentes temperaturas.

La representación de la Ley de Planck es una familia de curvas (ver figura 4.4) que representan la distribución de la energía en todo el espectro para diferentes temperaturas del cuerpo negro.

### Ley del desplazamiento de Wien

La fórmula de Wien determina la longitud de onda a la cual se produce la máxima radiación de energía para una temperatura determinada. Su expresión se obtiene diferenciando la fórmula de Planck respecto a  $\lambda$  y calculando el máximo, resultando:

$$\lambda_{\max} = \frac{2898}{T} \quad [\mu\text{m}] \quad (4.2)$$

La ley de desplazamiento de Wien representa un desplazamiento hacia longitudes de onda mas cortas a medida que aumenta la temperatura (ver figura 4.5). Cuando

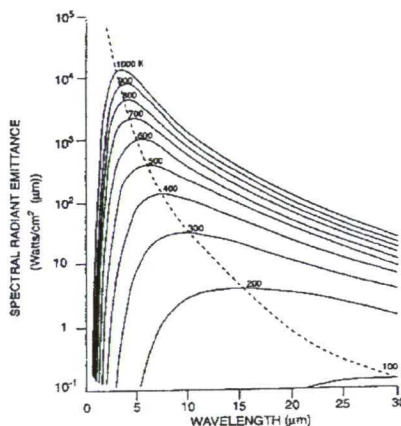


Figura 4.5: *Ley de desplazamiento de Wien. La línea de puntos es el lugar de los puntos de máxima radiación.*

se calienta un metal se llega a poner de color rojo. Si se va a temperaturas cada vez mayores, se produce una variación de color hacia el naranja o el amarillo.

Así, una estrella como Sirius (11 000 K) emitiendo una luz blanca azulada, tiene un pico de radiación espectral [JAIN 1996] en el ultravioleta invisible a una longitud de onda de  $0.27 \mu\text{m}$ .

El Sol (6000K) tiene su máximo de radiación en  $0.5 \mu\text{m}$  (amarillo), centrado en el espectro visible. A temperatura ambiente (300 K) el máximo de emisión se produce a  $9.7 \mu\text{m}$ , dentro del infrarrojo medio, mientras que en el nitrógeno líquido (77 K), la muy baja radiación se centra a  $38 \mu\text{m}$ , dentro del infrarrojo extremo.

### Ley de Stefan-Boltzman

En 1879 el físico austriaco Josef Stefan demostró experimentalmente que la radiación total emitida por un cuerpo en condiciones ideales, era función únicamente de su

temperatura. Ludwig Boltzmann, en 1884, llegó a la misma conclusión de un modo teórico basándose en conceptos termodinámicos.

Idealmente, un cuerpo que absorbiera toda la radiación incidente define una potencia emitida por unidad de superficie (emitancia radiante total) obtenible directamente de la Ley de Planck. La expresión de la Ley de Stefan-Boltzmann que da la radiación total emitida por unidad de superficie, puede obtenerse directamente de la ley de Planck [INCROPERA 1999], [TOULOUKIAN 1990], si se integra a todo el rango de longitudes de onda, resultando la ecuación siguiente, similar a la ecuación 3.14 si se integra a lo largo de toda la superficie del cuerpo:

$$W = \sigma T^4 \quad [\text{W m}^{-2}] \quad (4.3)$$

siendo:

W: radiación total del cuerpo negro

La Ley de Stefan-Boltzmann establece que el poder emisivo total de un cuerpo negro es proporcional a la cuarta potencia de su temperatura absoluta. Gráficamente representa el área encerrada bajo la curva de Planck para una determinada temperatura.

#### Ley de Kirchhoff

Se denomina emitancia radiante  $W$  a la energía radiante emitida por una superficie (por unidad de tiempo y área), estando relacionada con la emitancia radiante del cuerpo negro  $W_{bb}$  en función de la fracción  $a$  de energía emitida a partir de la energía que incide sobre ella, por la expresión,

$$W = aW_{bb} \quad (4.4)$$

Como la expresión 4.4 se cumple para todas las superficies que estén a la misma temperatura, se deduce que la relación  $W/a$ , razón de la emitancia radiante de cualquier superficie a su poder absorbente, es la misma para todas las superficies y por tanto también igual a la emitancia radiante de un cuerpo negro a dicha temperatura. Por tanto la emisividad y la absorptividad tienen el mismo valor para cada superficie.

#### 4.2.3 Comportamiento de una superficie radiante real

En la práctica, las superficies reales no se comportan como emisores ideales para todo el espectro de radiación, sino que solo son capaces de emitir una determinada proporción de la energía que emitiría un cuerpo negro. La capacidad de emisión de



los cuerpos reales se determina por el parámetro denominado emisividad<sup>2</sup>  $\varepsilon$  cuyo valor está comprendido entre 0 y 1, definido como la capacidad real de emisión (absorción) del objeto respecto a la que tendría un cuerpo negro a la misma temperatura.

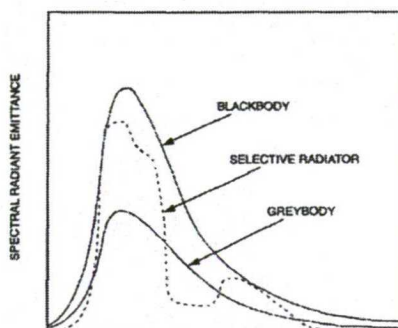


Figura 4.6: Radiación espectral diferente para cuerpo negro, cuerpo gris y cuerpo real.

En estas condiciones la Ley de Stefan-Boltzmann para un determinado cuerpo real queda:

$$W = \varepsilon \sigma T^4 \quad [\text{W m}^{-2}] \quad (4.5)$$

donde:

W: radiación total del cuerpo negro

Aunque en muchas situaciones prácticas se puede considerar la emisividad como una constante propia de cada material, en realidad la emisividad es función de la longitud de onda (según se vió en la hoja 32), de la temperatura y del ángulo de incidencia (según se vió en la hoja 33) u observación de la radiación.

De este modo la emisividad de los materiales reales puede tomar valores muy distintos en función de la región espectral considerada (ver figura 4.6). La nieve, por ejemplo, refleja la práctica totalidad de la radiación visible, mientras que presenta una alta emisividad en el infrarrojo medio.

La variación de la emisividad con la temperatura, tiene unas claras diferencias entre metales y no metales. En los primeros la emisividad espectral tiende a subir con la temperatura, mientras que en los segundos disminuye al aumentar la temperatura.

El ángulo de observación puede tener gran influencia sobre la emisividad aparente de una superficie. A partir de un determinado ángulo, que depende del tipo de mate-

<sup>2</sup>Recordar que según la Ley de Kirchhoff, emisividad y absorptividad son iguales.

rial,<sup>3</sup> la emisividad baja rápidamente, llegando a cero para un ángulo de incidencia de 90°. Esto es importante tenerlo en cuenta a la hora de situar el pirómetro respecto de la superficie donde se quiere medir la temperatura.

### 4.3 Definición e instrumentación del sistema de control

En la figura 4.7 se muestra un diagrama del sistema de control donde se señala la situación física de los componentes del sistema de control. Por un lado está el proceso industrial que se quiere controlar, localizado alrededor de la máquina donde se va a realizar el proceso. Consta del generador láser mesa de coordenadas, la pieza bajo tratamiento y el sensor que mide una variable del proceso. La tarjeta de adquisición tiene la misión de recoger la señal del pirómetro, convertirla de formato analógico a digital y almacenarla en el registro de lectura y escritura que determine el programa. Una vez procesada por el programa, según determinado algoritmo de control, se almacena en otro registro, se convierte a formato analógico y se pone en una de las salidas que está conectada con el armario de control del sistema láser. Tanto la tarjeta como el algoritmo de control están físicamente integrados en un ordenador personal o PC de control.

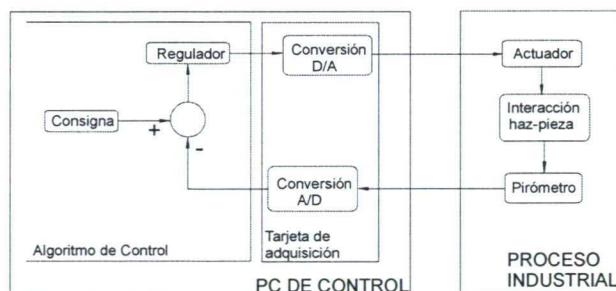


Figura 4.7: Diagrama del bucle de control en lazo cerrado.

#### 4.3.1 Tiempos reales de los diferentes procesos-sistemas que intervienen

Para determinar las necesidades de cálculo de procesador, así como de la velocidad de la tarjeta de entrada/salida de datos es necesario conocer los tiempos de respuesta de

<sup>3</sup>En general 60 ° para dieléctricos y 40 ° para los metales.

los diferentes sistemas que van a formar parte del sistema de control para ir acotando el periodo de muestreo necesario. Estos son los siguientes:

#### El tiempo de respuesta del propio proceso

Esto incluye la respuesta desde que la radiación láser incide sobre la pieza a tratar hasta que la superficie de la pieza alcance determinado valor dentro de la zona de interés que es donde ocurre el proceso de temple. Efectuadas unas pruebas experimentales sobre unas probetas de acero F-114 de dimensiones 60 mm x 40 mm x 10 mm, para unos parámetros de proceso: velocidad relativa láser/pieza de  $10 \text{ mm s}^{-1}$ , anchura de haz  $w=3.5 \text{ mm}$  y potencia láser 2000 W se obtiene una respuesta en temperatura como la

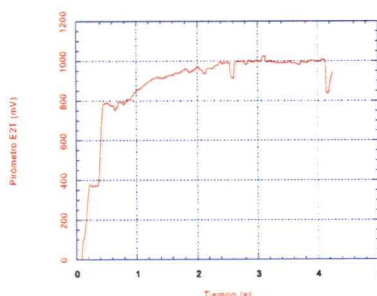


Figura 4.8: *Respuesta temporal láser-probeta.*

de la figura 4.8, donde se aprecia que el rango de temperaturas deseadas se alcanza al cabo de un tiempo del orden de entre 2.5 s y 3 s. Con estos tiempos tan grandes es de esperar que las limitaciones del tiempo no sean muy críticas para el resto de componentes.

#### Periodo de muestreo del pirómetro

Dado el tiempo de respuesta del propio proceso, se considera que cualquier pirómetro que tenga un periodo de refresco entre 10 a 20 veces (según las teorías de control) inferior que el tiempo característico del proceso sería aceptable, con lo que un periodo de 0.1 s sería en principio suficiente para esta aplicación.

Pensando en futuras aplicaciones de este mismo equipo para procesos de soldadura o refusión en los que, por utilizar un diámetro de haz mucho menor, el tiempo característico de respuesta del sistema láser-pieza disminuye drásticamente hasta ser del orden de 0.1 s. Para estos casos, un valor de 10 ms para el periodo de refresco de la señal pirométrica sería más adecuado.

Por tanto se elige el pirómetro modelo 7000EH-2 de E<sup>2</sup>Technology Corporation, con un periodo de muestreo de 10 ms.

Este pirómetro dispone de salidas de señal de temperatura en tensión 1 mV/°C y en lazo de corriente 4 a 20 mA. El resto de características de este equipo se describen en el Apéndice A.

#### Tiempo de ejecución del algoritmo de control por el PC

El tiempo a considerar aquí es el que transcurre desde que la señal del pirómetro entra en la tarjeta de adquisición montada en un ordenador personal (de características descritas en el Apéndice A), se transforma a formato digital, es leída y filtrada por el algoritmo de control (se verá la necesidad de este filtrado en la página 131), se ejecuta el algoritmo de control y manda una señal analógica a través de una salida de la misma tarjeta de adquisición. Se realizaron pruebas introduciendo escalones de referencia y midiendo el tiempo que tarda el conjunto antes señalado en variar la salida. Dado que el programa funciona bajo entorno Windows, el tiempo real empleado depende de las diferentes interrupciones que debe atender el procesador, que son variables en el tiempo. De todos modos, en todos los casos comprobados experimentalmente se obtiene un tiempo de ejecución total inferior a 5 ms con un ordenador Pentium II a 300 MHz y desciende a 8.3  $\mu$ s con un Pentium III a 1.4 GHz (ver apartado 5.5), por lo que si se escoge el periodo de muestreo superior, se asegura el determinismo del sistema de control.

#### Tiempo de respuesta del control numérico

La señal que nos entregue el ordenador después de efectuar el algoritmo de control para determinar el nuevo valor de la consigna de potencia y a efectos de coordinar con el movimiento de la pieza y con el fin de que el sistema esté supervisado por el sistema de alarmas con que cuenta dicho sistema, se envía a través del autómatas que controla el estado y los movimientos de la mesa de coordenadas. La señal se convierte de analógica a digital, el autómatas controla que esté dentro el rango de valores admitidos por el resonador láser y se manda en el momento oportuno hacia el armario que controla el resonador láser, una vez convertido otra vez a formato analógico, que es el admitido por el control del láser. Como el autómatas está corriendo de forma periódica su programa PLC, necesita determinado tiempo para leer las entradas, convertirlas a formato digital, comprobar que están dentro del rango previsto y ponerlas en las salidas, una vez convertidas de nuevo a formato analógico. Se comprobaron estos tiempos midiendo con un osciloscopio el desfase que se obtiene entre la entrada y salida del control numérico introduciendo una señal cuadrada de referencia. Dado que



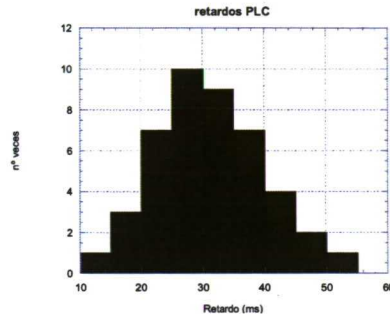


Figura 4.9: Retardo en señal control debido al PLC.

el programa PLC tiene diversas subrutinas que, dependiendo del estado del sistema pueden ejecutarse o no, el tiempo obtenido no es constante a lo largo de las numerosas pruebas efectuadas, pero representando en un histograma de frecuencias (ver figura 4.9) y de los valores de los datos obtenidos se calcula que el valor medio es de 31 ms y la desviación típica de 9 ms. Vemos por tanto que el valor de consigna que introduzcamos a través del control numérico va a sufrir un retardo, en promedio, entre 20 ms y 40 ms por lo que el periodo de muestreo debe ser de este mismo orden de magnitud. Si fuera mucho menor, repetiría el valor anterior de la consigna con lo que el control no se enteraría, si fuera mucho mayor el sistema podría quedar fuera de control.

#### Velocidad de adquisición y periodo de muestreo de la tarjeta de adquisición

Para asegurar precisión en la reconstrucción de la señal, el número de periodos de muestreo en el tiempo de subida del sistema sin control debe ser del orden de 4 a 10 veces [ASTRÖM 1997]. Como ya hemos visto en la página 113, el tiempo de subida del sistema está entre 2.5 s y 3 s. Por otro lado para un eficiente rechazo frente a interferencias, la frecuencia de muestreo debe ser de 10 a 20 veces el ancho de banda del modelo del sistema, por lo tanto el número de periodos de muestreo debería ser como mínimo de 30 en los 3 s, esto es 10 muestras por segundo o periodo de 100 ms.

Una vez analizados los tiempos característicos de cada uno de los equipos que intervienen en el proceso se determina que la velocidad de muestreo adecuada, de acuerdo a la teoría de control, será de 20 ms.

#### 4.3.2 Requisitos de entradas y salidas

Para definir la tarjeta de adquisición entrada-salida se deben ver las necesidades reales para la aplicación al tratamiento superficial.

En primer lugar se necesita que disponga de al menos una entrada analógica en tensión para la señal del pirómetro. La señal de salida del pirómetro en tensión es de  $1 \text{ mV} / ^\circ\text{C}$ . Como el rango del pirómetro está entre 723 K y 2123 K ( $450 ^\circ\text{C}$  y  $1850 ^\circ\text{C}$ ) la señal esperada va a estar entre 450 mV y 1850 mV que debe estar dentro del rango de las entradas de la tarjeta.

También se necesita que disponga de una salida analógica en tensión para poder controlar la potencia del láser. La señal que admite el sistema láser para el control externo de potencia está entre 0 V y 10 V de corriente continua, logrando con esto variar la potencia de salida entre el 0 % y el 100 % de la nominal.

Además se necesitan entradas y salidas digitales para utilizarlas como señales de coordinación del comienzo y parada de la actuación del regulador con el inicio y parada -respectivamente- de la radiación láser.

#### Elección de la tarjeta

De entre varias tarjetas comerciales que cumplieran los requisitos inicialmente expuestos, se encuentra que la oferta del mercado incluye normalmente varias entradas y salidas analógicas así como varias digitales.

Se eligió una tarjeta de capacidad de muestreo de  $5 \times 10^5$  registros por segundo cuando se usa un solo canal de entrada, con lo que se podría muestrear cada  $2 \mu\text{s}$ . Siguiendo la teoría de control, el tiempo de muestreo deberá ser 10 ó mas veces mas rápido que la constante de tiempo mas rápida de todo el sistema real. Se podría pensar partir para este cálculo del tiempo de muestreo del pirómetro, pero como este tiempo es fijo, lo que determina la respuesta real del sistema es el tiempo de interacción láser-materia -del orden de 2 s- y se elegirá, por tanto un periodo de muestreo de 20 ms que corresponde a 50 muestras por segundo.

Usando un solo canal de entrada esta tarjeta es suficientemente rápida para esta aplicación. Además esta tarjeta, a través de sus entradas y salidas digitales, permite sincronizar los diferentes equipos que intervienen.

La tarjeta elegida es la PCI-MIO-16E-4<sup>©</sup> de National Instruments, que tiene las siguientes características principales (resto en el apéndice A):

- 8 entradas en modo diferencial ó 16 entradas en modo normal
- Máxima velocidad de muestreo 500 kS/s (usando un solo canal)
- Entradas de 0 a 10 V en modo diferencial y entre  $\pm 5 \text{ V}$  en modo normal
- Salidas analógicas: 2 salidas seleccionables entre  $\pm 5 \text{ V}$ , 0 a 10 V
- 8 Entradas y salidas digitales. Compatibles TTL/CMOS.

### Elección del ordenador

En principio se comenzaron las pruebas con el ordenador personal disponible inicialmente, bajo sistema operativo Windows 98<sup>®</sup>, con procesador Pentium II<sup>®</sup> a 300 MHz. A continuación se dan los tiempos característicos del mismo para realizar determinadas tareas:

- 100  $\mu$ s si el ordenador sólo ejecuta una tarea del programa de control en tiempo real
- 0.5 ms si el ordenador soporta una actividad moderada de entrada/salida (teclado, ratón, etc.)
- Varios milisegundos si se carga una aplicación compleja, como por ejemplo un procesador de textos
- 18 ms si se escribe un archivo de gran tamaño en el disco duro. De aquí la necesidad de utilizar archivos de datos de texto sin formato para limitar su tiempo de escritura.

Se ve por un lado, el gran condicionamiento que tiene un sistema comercial para realizar tareas de control. Sin embargo, si se limita el uso de los recursos a lo estrictamente necesario y utilizando un formato de ficheros adecuado, los tiempos de ejecución son inferiores, con cierto margen, a 1 ms por lo que cualquier proceso físico, cuyo tiempo característico sea superior a este, es susceptible de ser controlado mediante un ordenador comercial, con el consiguiente ahorro de coste y de tiempo de incorporación de un programa de control.

En el caso que nos ocupa, con periodos de muestreo necesarios de 20 ms, debe ser suficiente. En la página 166 se comentará la capacidad del ordenador finalmente utilizado, cuando está corriendo el programa con el regulador PID ya integrado.

#### 4.3.3 Incorporación a ordenador y programa de adquisición

Los reguladores PID (proporcional, integral y derivativo) del error entre la consigna de referencia deseada y el valor realmente alcanzado por el sistema, son muy empleados en el ámbito industrial como consecuencia del extenso conocimiento que se tiene sobre su comportamiento, así como su facilidad de sintonización.

A la hora de realizar un regulador de control de este tipo hay dos opciones: construirlo físicamente a partir de componentes electrónicos normales (amplificadores operacionales, resistencias, condensadores, etc.) o sintetizarlo a partir de algún programa como Matlab<sup>®</sup> ó LabVIEW<sup>®</sup>.



La primera opción es en principio menos costosa; pero, para poder variar la ganancia del sistema o ajustar los parámetros del controlador para optimizar el sistema de control, es necesaria la tediosa labor de ir cambiando los componentes y volver a realizar experimentos con el sistema real una y otra vez hasta optimizar el sistema. Esto conlleva el empleo de mucho tiempo y gasto de materiales.

Con cualquiera de los métodos de la segunda opción se puede realizar la identificación del sistema (su respuesta ante escalones y rampas) y permitir sintonizar el sistema de control sin necesidad de realizar muchos experimentos. Solo son necesarias una o dos pasadas con diferentes escalones de potencia en cada una de ellas, registrando la respuesta del sistema en forma de un valor de la temperatura superficial, para identificar la respuesta del sistema para determinadas condiciones. Cabe destacar que si las condiciones reales del proceso se alejan mucho de las consideradas en el estudio de la respuesta a escalones es muy posible que la respuesta del sistema sea diferente, según se comenta en página 176 y sea necesario realizar una identificación del sistema para las nuevas condiciones.

Además presenta la ventaja adicional de facilitar el registro de valores de los parámetros del sistema durante el funcionamiento que facilitan el control de la calidad del proceso realizado y permiten tener datos reales de proceso para la trazabilidad de los productos obtenidos con el tratamiento.

El desarrollo del sistema de control en el entorno de programación Matlab<sup>®</sup> es la opción mas académica. Con ella, los parámetros del regulador se sintonizan y validan por simulación [RÖMER 1999] del regulador y la identificación del sistema usando sus diferentes toolboxes (System Identification, Simulink, etc.). Así, SIMULINK<sup>®</sup>, que es una herramienta para simulación de sistemas dinámicos, proporciona un interface de usuario gráfico (GUI) para construir diagramas de bloques representativos del sistema. Además, SIMULINK<sup>®</sup> facilita interactuar con otras herramientas de MATLAB<sup>®</sup> que permiten analizar y visualizar los resultados de la simulación, pero exige al diseñador del sistema (técnico operador o ingeniero) tener cierta experiencia en el uso del programa Matlab<sup>®</sup>. Un ejemplo de este método se puede ver en [MOLPECERES 2002] donde se obtiene primero la función de transferencia de todo el conjunto: actuador, resonador láser, interacción láser-materia, pirómetro, filtro paso-bajo y conversión analógico-digital, para luego obtener el regulador por síntesis directa buscando las condiciones de estabilidad y buena respuesta dinámica.

Por el contrario, el método que se utilizó en esta tesis fué el desarrollo de un sistema de control utilizando LabVIEW<sup>®</sup>, es mas adecuado de cara a la futura exportación del sistema de control al mundo empresarial, dada la amplia expansión del uso de LabVIEW<sup>®</sup> para el control de procesos industriales, a la vez de que dispone de servicio de apoyo técnico a nivel mundial para adaptar un sistema de control a las necesidades



concretas de cada empresa. Con esta última herramienta también se puede realizar tanto la sintonización manual como la automática, como se comentará en el capítulo posterior.

## 4.4 Implementación del sistema de control

### 4.4.1 Instrumentación de las medidas con pirómetro

#### Requisitos generales del equipo pirométrico

Desde el punto de vista de su integración en un sistema de control, el pirómetro es un dispositivo que capta la radiación emitida desde la superficie del material bajo tratamiento, mediante una óptica de enfoque adecuada que garantiza una determinada área de medida y disponiendo de la electrónica apropiada, suministra una señal eléctrica (en tensión o en intensidad) proporcional a la temperatura de la superficie. Esta señal se puede introducir mediante una tarjeta de adquisición de datos, en un ordenador personal o industrial para su posterior uso como parte del sistema de control.

Para que el sistema de control aquí diseñado se pueda exportar con éxito en aplicaciones industriales reales,<sup>4</sup> este equipo debe cumplir una serie de requisitos:

1. Debe ser considerablemente insensible a variaciones en la emisividad del material a procesar, ya que de otro modo, se producirían resultados no deseados.
2. Debe ser capaz de medir temperaturas entre los 700 °C y los 1500 °C que son las temperaturas entre las que tiene lugar la transformación de la austenita.
3. Debe ser lo suficientemente rápido como para detectar los cambios que se puedan producir en la temperatura, teniendo en cuenta que el tiempo de respuesta característico del material ante la exposición a la radiación láser es del orden del segundo.
4. No debe ser sensible a la radiación que el láser pueda reflejar sobre el pirómetro. Como el láser utilizado es de CO<sub>2</sub>, el pirómetro no debe ser sensible a la radiación de 10.6  $\mu\text{m}$ .
5. No debe trabajar en longitudes de onda en las que el aire absorbe una parte de la radiación emitida ya que, podría provocar errores. Atendiendo a esto, los rangos mas adecuados son: 0.4  $\mu\text{m}$ -1.3  $\mu\text{m}$ ; 2.0  $\mu\text{m}$ -2.6  $\mu\text{m}$ ; 3.0  $\mu\text{m}$ -4.1  $\mu\text{m}$ ; 4.5  $\mu\text{m}$ -5.5  $\mu\text{m}$  y 8.0  $\mu\text{m}$ -9.5  $\mu\text{m}$ .

<sup>4</sup>Con condicionantes mas exigentes que los que se dan en un laboratorio de experimentación.

**Diseño del soporte. Variaciones en la distancia boquilla-pieza**

El primer problema que se encuentra es que el pirómetro se debe apuntar en cada caso al punto más caliente de la superficie bajo tratamiento. Como ya se ha comentado este punto varía en función de la velocidad relativa haz-pieza, potencia del haz, además de las propias propiedades del material. Además si se varía la anchura del modo láser también varía la posición de este punto. Si siempre se usa el mismo láser en principio tendría la misma anchura; pero ésta es modificada por la lente de enfoque de tal modo que si variamos la distancia entre la lente y la pieza se varía la posición del punto mas caliente y además como (por interferencia física en el montaje) el eje del pirómetro no coincide con el del láser, al variar la distancia se modifica el punto de la superficie donde está midiendo el pirómetro, según queda reflejado en la figura 4.10, obteniendo una lectura de temperatura mucho menor.

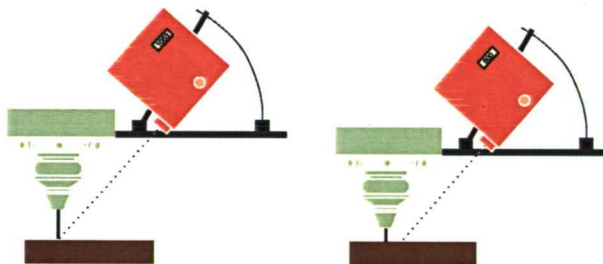


Figura 4.10: Variación del punto de medida del pirómetro al variar la distancia entre la lente y la probeta.

Si el soporte del pirómetro es rígido en una posición fija, nos obliga a mantener siempre la misma distancia a la pieza y si esta se variase para obtener un ancho del tratamiento mayor, estaríamos obligados a modificar el soporte para adaptarlo a la nueva posición. Incluso sin variar la distancia, si variamos la velocidad tendremos que modificar el punto de medida de todos modos.

Se hace necesario un soporte mas versátil que permita ajustar con facilidad la posición del pirómetro. Se pensó en un sistema como el de la figura 4.11, que permite el movimiento en tres ejes de modo totalmente independiente y sin necesidad de utilizar llaves mecánicas. La inclinación del brazo inclinado se ajusta una vez mediante un tornillo que hace de prisionero de la pieza de latón superior. En cada uno de los otros dos ejes se dispone de un tornillo con un mando sobre el que se actúa manualmente, permitiendo apuntar el pirómetro al punto que deseemos en cada caso.

Para saber el punto donde está apuntando el pirómetro en cada caso se utiliza un

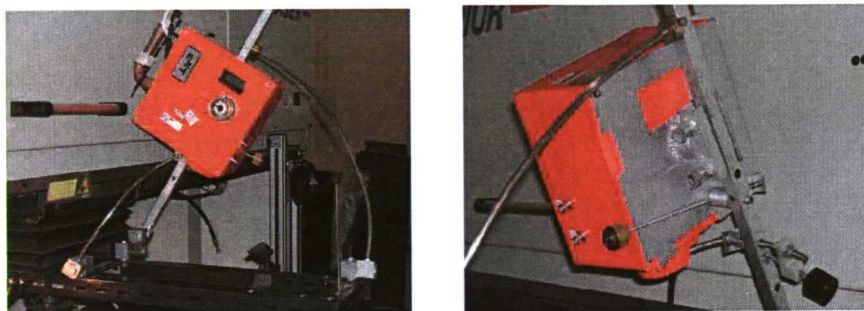


Figura 4.11: *Soporte del pirómetro ajustable en tres ejes independientes.*

sistema patentado que se explica en la hoja 121.

#### **Alineación al punto de máxima temperatura**

Aunque el pirómetro dispone de una mirilla, dotada de un anillo para facilitar el apunte del pirómetro a un punto concreto de la superficie de la probeta, este sistema no se puede utilizar una vez que el pirómetro está montado en el soporte descrito en el apartado anterior por quedar a una altura que imposibilita acercarse hasta la mirilla.

Para facilitar la alineación del pirómetro al punto deseado variable en cada proceso a realizar se diseñó un sistema de alineación que luego se patentó,<sup>5</sup> está basado en un sistema que proyecta un punto luminoso de alta intensidad sobre la superficie donde se desea medir la temperatura superficial de una pieza. El sistema permite una rápida recolocación sin necesidad de acceder visualmente a través de la mirilla del pirómetro, inaccesible una vez montado en su soporte, como se ha dicho anteriormente.

El sistema de puntería para pirómetro tiene un soporte adaptado y rígidamente unido a la carcasa del propio pirómetro justo frente a la abertura disponible del ocular según se indica en la figura 4.12. Puede observarse que el sistema de puntería para pirómetro está esencialmente constituido por una fuente láser (7) que está situada frente al ocular (6) de que dispone la carcasa exterior (2) del pirómetro. El haz láser se refleja en el divisor de haz (5) que, junto con el sistema de lentes (4), forma parte de los elementos ópticos del pirómetro que dirigen la radiación emitida por la superficie (1) hasta el sensor (3) del pirómetro. El haz láser, después de reflejarse en el divisor de haz (5) antes citado, pasa a través de la óptica (4) focalizándose en la superficie de la pieza (1) en forma de un pequeño punto brillante (8). Por reflexiones parciales en

<sup>5</sup>Número de solicitud de patente: P200101029. País de prioridad: España. Fecha de prioridad: 23-04-01.



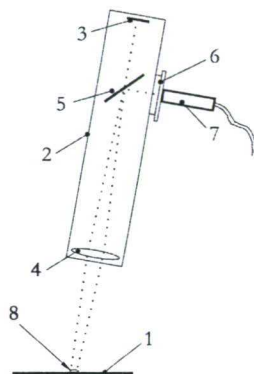


Figura 4.12: Disposición general esquemática del sistema de puntería.

las diferentes lentes, la figura proyectada real consta de tres puntos luminosos: Uno mas intenso y otros dos a ambos lados del anterior, como se puede apreciar en la figura 4.16.

El hecho de utilizar una fuente láser (diodo láser o similar) con sistema de focalización propio, permite enfocar el haz láser en un punto lo suficientemente pequeño a la distancia en que se encuentra la superficie cuya temperatura se mide. Así el haz proporcionado por la fuente láser montada en este soporte, se proyecta a través del camino óptico del sistema de medida del pirómetro, proyectando un punto luminoso de elevado contraste, dadas las características de la emisión láser, sobre la superficie a medir. El soporte donde se aloja la fuente láser dispone de un sistema de ajuste que permite variar la posición relativa del eje del haz láser proyectado, con el eje óptico del sistema de medida del pirómetro. Una vez alineado el láser con el eje óptico del pirómetro, basta mover la carcasa del pirómetro y apuntar directamente con el estrecho punto luminoso del láser al punto de la superficie cuya temperatura se quiere medir. Es evidente que el soporte del pirómetro debe permitir un fácil movimiento y fijación en las distintas posiciones deseadas y definidas con la fuente láser. Cosa que es factible con el soporte diseñado y descrito en el apartado 4.4.1.

De forma más concreta, el sistema de puntería para pirómetro dispone de una fuente láser visible dotada de una lente de focalización para poder ajustar el diámetro del punto proyectado a la distancia que hay desde la situación del pirómetro hasta la de la superficie a medir. También tiene un equipo auxiliar que se describe en la hoja 127 que facilita la alineación de la fuente láser con el punto de medida del pirómetro, para facilitar tanto la alineación inicial como las periódicas dentro del plan de mantenimiento de la instalación.



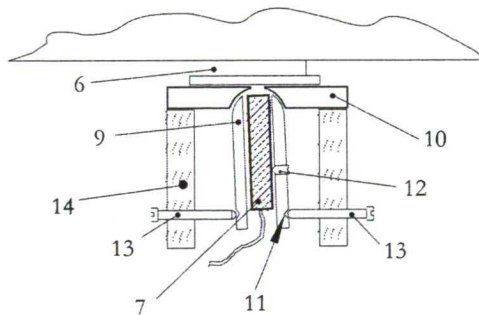


Figura 4.13: Soporte de la fuente láser de alineación.

En la figura 4.13 se muestra una sección del sistema de puntería para pirómetro para una configuración particular donde se aprecian la situación relativa del soporte de la fuente láser respecto del ocular del pirómetro, el dispositivo mecánico que permite el movimiento relativo entre los ejes del haz láser y el del sistema de medida. Para permitir la alineación del eje del láser con el eje del sistema de medida del pirómetro, se monta la fuente láser (7) sobre un sistema similar al que se describe en la figura 4.13. Sobre el ocular (6) disponible en el pirómetro, se monta un conjunto formado por las piezas que a continuación se describen. Una pieza cilíndrica hueca (9) con el extremo por donde sale el haz láser acabado en semiesfera. Este extremo semiesférico se apoya en otra superficie semiesférica mecanizada en la pieza (10) de un material de bajo coeficiente de rozamiento para facilitar el deslizamiento entre ellas. En la pieza cilíndrica hueca (9) se propone efectuar un collarín (11) en el extremo opuesto a aquel por donde sale el haz láser, en donde se alojan los dispositivos de sujeción (13) que fijan la posición de la pieza (9) respecto del cilindro exterior (14) según se explica en el siguiente párrafo. En el interior de la pieza cilíndrica hueca se fija la fuente láser con la ayuda de un prisionero (12) y se sitúa de tal forma que el extremo del cuerpo de la fuente láser quede a paño con el extremo semiesférico de la pieza. De este modo se puede variar la inclinación del eje de la fuente láser sin alejarse demasiado del eje óptico del ocular.

La figura 4.14 (que es una vista frontal de la figura anterior) muestra una ejecución del sistema que permite el movimiento y fijación en determinada posición de la fuente láser a su soporte. En ella se indica un dispositivo que permite el movimiento de la pieza cilíndrica hueca (9), solidaria con la fuente láser (7), respecto al cilindro exterior (14). Consta de un conjunto formado por los dos tornillos (13) orientados a  $90^\circ$  entre sí y en la bisectriz de estos y en el lado opuesto, un palpador (15) empujado por un

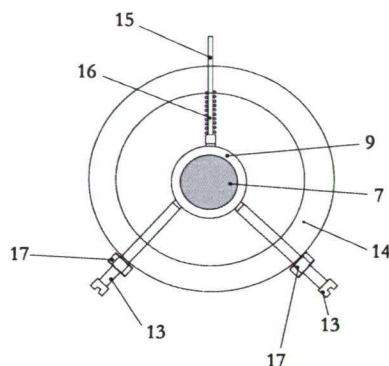


Figura 4.14: Sistema de ajuste y fijación del diodo.

muelle (16). Los dos tornillos disponen de unas contratuercas (17) para fijar la posición una vez alineada la fuente láser con el punto de medida del pirómetro. En la figura



Figura 4.15: Vista del dispositivo real.

4.15 se puede ver el dispositivo real de la pieza elaborada acoplada a la carcasa del pirómetro que sirve de soporte y ajuste del diodo láser utilizado como auxiliar para el apunte del pirómetro al punto de la superficie de mayor temperatura.

La figura 4.17 muestra el dispositivo auxiliar para realizar la alineación inicial y periódicas de la fuente láser con el sistema de medida del pirómetro. Con este dispositivo se realiza la alineación como a continuación se describe.

Se elige un blanco cuya temperatura esté dentro del rango de medida del pirómetro y que tenga una superficie mayor que la del orificio más grande. Dependiendo del valor de la temperatura del blanco, el disco con orificios se situará a una distancia suficiente para que la superficie del disco se mantenga a temperatura ambiente, esto es para

que la radiación del blanco no eleve la temperatura del disco durante la alineación del sistema. El pirómetro se situará, en función de la óptica disponible, a la distancia correspondiente a su distancia focal de medida.

Se procede a alinear el pirómetro hasta obtener la temperatura máxima del blanco medida a través del orificio de mayor diámetro. Se va girando el disco para ir pasando a orificios más pequeños. Dependiendo de la aplicación y de la óptica del pirómetro, se necesitará llegar a los orificios más o menos pequeños, manteniendo en todo caso, la lectura del pirómetro en su valor máximo, ajustando su alineación si fuera necesario en cada paso de un orificio al inmediato inferior.

Posteriormente se alinea la fuente láser apuntando el punto luminoso al orificio a través del cual está midiendo el pirómetro. Así, para saber donde está midiendo el pirómetro bastará ver donde está situado el punto luminoso proyectado por la fuente láser. Como comprobación se puede mover el pirómetro de su posición de medida, ajustarlo de nuevo al orificio guiándose solo por la situación del punto luminoso de la fuente láser y comprobando que cuando este punto está situado sobre el orificio, la medida del pirómetro vuelve a ser la misma que se tenía en las condiciones del final del párrafo anterior.

#### Procedimiento experimental de alineación

Para controlar en que punto de la superficie de la pieza a tratar debe apuntar el pirómetro es muy fácil seguir el siguiente procedimiento. A partir de los parámetros del proceso se realiza una simulación numérica específica ó se calcula el número de Peclet (según se indicó en página 81) para definir a qué distancia por detrás del centro del haz está situado el punto mas caliente.

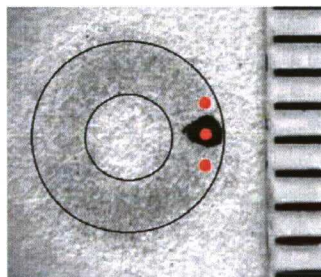


Figura 4.16: *Figura donde se ve la huella del disparo sobre el papel y los puntos proyectados del diodo sobre esa superficie.*

Luego se sitúa un papel sobre la superficie de la pieza a tratar y se realiza un disparo

de corta duración para quemar ligeramente con el láser situado a la distancia a la que se va a efectuar posteriormente el proceso. Así, para saber donde está midiendo el pirómetro bastará ver donde está situado el punto luminoso proyectado por la fuente láser con respecto al impacto sobre el papel, según se aprecia en la figura 4.16.

#### **Determinación del área de medida del pirómetro**

En la práctica, un pirómetro mide la radiación emitida no de un solo punto concreto de la superficie emisora sino que el resultado de la medida es un promedio de las temperaturas puntuales existentes en determinada área de medición. El área de medición puede aumentarse o disminuirse, variando la óptica del pirómetro y esa área concreta de medida es la que tiene en cuenta el fabricante en el proceso de calibración el equipo. Así los fabricantes suelen calibrar el equipo para determinada óptica que permite efectuar la medida en un área determinada para una distancia focal determinada. Si se cambia la óptica es necesario volver a calibrar el pirómetro.

En función de las condiciones del proceso se necesitará una distancia focal mayor o menor. Así para un proceso de temple superficial en donde no hay fusión del material se puede disponer el pirómetro a una distancia del punto de interacción láser-materia mucho menor que si se trata de un proceso de soldadura donde, por la mayor probabilidad de que existan proyecciones de material fundido, se necesita alejar mas el equipo de medida para evitarle daños dado su coste de adquisición suficientemente elevado.

Dadas las características de la distribución de las temperaturas de la superficie de un metal sobre el que incide una radiación láser para lograr efectuar un endurecimiento superficial, que hace que los gradientes de temperaturas sean grandes para asegurar una determinada velocidad de enfriamiento, interesa que el área de medida sea bastante limitada para que la medida de temperatura integrada en toda la superficie se acerque mas al mayor valor de temperatura, lo que limita la elección de la óptica.

Como el rango de medida del pirómetro (el limite superior es de 1850 °C) supera el punto de fusión de muchos metales, se pretende utilizar el pirómetro en otros procesos además del de tratamiento térmico superficial. Por tanto se decide una óptica con distancia focal de 600 mm, mayor que la necesaria en procesos de temple pero que asegura la integridad del equipo en procesos donde se produzcan proyecciones de material fundido. Con está óptica el fabricante asegura un área de medida circular de un diámetro de 1,5 mm. Como debemos asegurar que nunca se sobrepasa la temperatura de fusión en la superficie de la pieza a tratar, se realizó una comprobación en primer lugar de la superficie real medida y posteriormente calcular, para una distribución superficial de temperaturas determinada, el valor medido por el pirómetro.



**Determinación experimental del diámetro de medida** Se cortó un disco de aluminio como la pieza (1) de la figura 4.17. Este mismo dispositivo de la figura 4.17 se utilizó (página 121) para comprobar la alineación del pirómetro con el diodo láser que se servirá para apuntar con facilidad el pirómetro a un determinado punto de la superficie de la pieza a tratar.

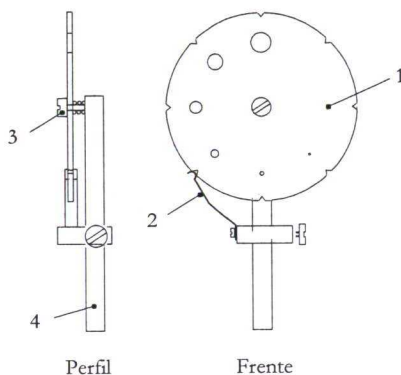


Figura 4.17: Disco para comprobación del área de medida y alineación.

En el disco (1) de aluminio de esta figura se efectuaron unos orificios<sup>6</sup> de diámetros decrecientes desde una medida de 6 mm hasta 1 mm. Todos los orificios tienen su centro en una misma circunferencia concéntrica con el centro del disco y el disco está taladrado en su centro para que pueda girar alrededor de un eje (3) que se monta sobre un poste (4) que permite sujetarlo sobre una mesa de desplazamiento de tres ejes como las utilizadas en montajes ópticos. Con el mismo ángulo de desfase entre los orificios se realizan unas muescas triangulares en la periferia del disco donde se apoya un resorte (2) de modo que al girar el disco el resorte permite unas posiciones fijas respecto de los diferentes orificios. Con este dispositivo se puede realizar una comprobación de la superficie de medida como a continuación se describe. Se elige un blanco extenso (mayor que los 6 mm correspondientes al diámetro del agujero mas grande) y cuya temperatura esté dentro del rango de medida del pirómetro.<sup>7</sup> Dependiendo del valor de la temperatura del blanco, el disco con orificios se situará a una distancia suficiente para que la superficie del disco se mantenga a temperatura ambiente, esto es para que

<sup>6</sup>Para cortar y perforar este disco se utilizó el láser de CO<sub>2</sub> utilizado en los tratamientos y la mesa de coordenadas disponible que proporciona una precisión mejor de una décima de milímetro.

<sup>7</sup>La pieza se puede calentar con el mismo láser de CO<sub>2</sub>, con poca potencia y muy desenfocado, esperando a que la temperatura se estabilice.

la radiación del blanco no eleve la temperatura del disco en el tiempo transcurrido para la comprobación del sistema. El pirómetro se situará, en función de la óptica disponible, a la distancia correspondiente a su distancia focal de medida.

Se procede a alinear el pirómetro hasta obtener la temperatura máxima del blanco medida a través del orificio de menor diámetro. Se va girando el disco para ir pasando a orificios de mayor diámetro mientras se observa la temperatura medida por el pirómetro. Esta indicación irá creciendo mientras el diámetro del agujero a través el cual está midiendo el pirómetro sea inferior al diámetro de la superficie de medida del mismo, como corresponde mientras la zona de medida comprende parte del disco (1) a temperatura netamente inferior a la del blanco. Dependiendo de la aplicación y de la óptica del pirómetro, se necesitará llegar a los orificios más o menos pequeños, manteniendo en todo caso, la lectura del pirómetro en su valor máximo, ajustando su alineación si fuera necesario en cada paso de un orificio al inmediato inferior.

En nuestro caso, la indicación del termómetro solo aumentó al pasar del orificio de 1 mm al de 2 mm por lo que se comprueba que el dato de 1.5 mm facilitado por el fabricante es bastante fiable. Al menos tenemos la seguridad que es menor de 2 mm.

Posteriormente se alinea la fuente láser apuntando el punto luminoso del diodo láser al orificio a través del cual está midiendo el pirómetro. Así, para saber donde está midiendo el pirómetro bastará ver donde está situado el punto luminoso proyectado por la fuente láser. Como comprobación se puede mover el pirómetro de su posición de medida, ajustarlo de nuevo al orificio guiándose solo por la situación del punto luminoso de la fuente láser y comprobando que cuando este punto está situado sobre el orificio, la medida del pirómetro vuelve a ser la misma que se tenía en las condiciones del final del párrafo anterior.

**Determinación por cálculo de la temperatura medida** Con un modelo como los descritos en capítulo anterior<sup>8</sup> se determina el campo de temperaturas para un material de propiedades: temperaturas  $T_{Ac1}$  735 °C,  $T_{Ac3}$  785 °C, temperatura de fusión 1480 °C, conductividad térmica  $\kappa = 40 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ , capacidad calorífica  $C_p = 500 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$  y densidad  $\rho = 7850 \text{ kg m}^{-3}$  y para las condiciones de proceso de la tabla 4.1

El punto mas caliente está situado a 2.78 mm por detrás del centro del haz. Se calcula la temperatura de una malla de puntos (20x20) en un cuadrado de 2 mm de lado centrado en el punto más caliente, según se muestra en la figura 4.18.

Como la radiación de un punto a la temperatura  $T$  es

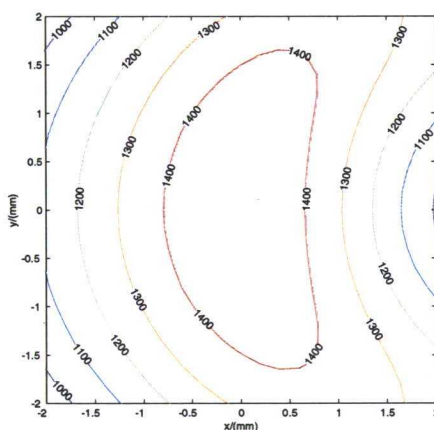
$$R = \varepsilon \sigma T^4$$

---

<sup>8</sup>Con un paso de tiempo de 0.1 s y tiempo final de simulación de 4 s.

Tabla 4.1: *Parámetros del tratamiento.*

Dimensiones	60x40x10 mm <sup>3</sup>
Potencia	1406 W
Coefic. Absorc.	51 %
Vel. relativa	10 mm / s
Anchura del modo ( $\omega$ )	3.5 mm
Temperatura inicial	300K

Figura 4.18: *Distribución de temperaturas alrededor del punto de temperatura máxima situado en  $x=0$ .*

para un conjunto de  $n$  puntos tenemos

$$R_n = \varepsilon \sigma \sum_{i=1}^n T^4$$

Está radiación equivaldría a la de  $n$  puntos con una misma temperatura dada por

$$R_n = \varepsilon \sigma \sum_{i=1}^n T^4 = n \varepsilon \sigma (\bar{T})^4 \Rightarrow \bar{T} = \left[ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n T^4 \right]^{1/4}$$

En la figura 4.19 se representa el cociente de la temperatura promedio dividida por la temperatura máxima  $T_0 = 1477$  °C para regiones circulares centradas en el punto más caliente. En el caso del pirómetro utilizado, el diámetro del área de medida es de 1.5 mm por lo que la diferencia entre el valor de temperatura medido y el real del punto mas caliente es del orden del 2 %, que representa unos 30 °C para una temperatura máxima de 1477 °C.

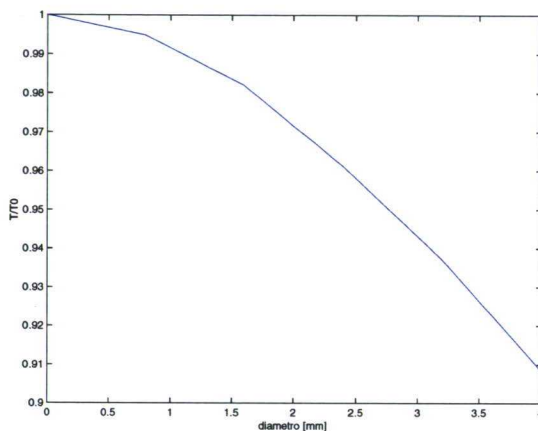


Figura 4.19: Relación entre la temperatura media y el valor máximo con el diámetro del área de medida del pirómetro.

#### Influencia del desplazamiento del punto mas caliente en la medida

A pesar de disponer de un sistema cómodo para la alineación del pirómetro al punto mas caliente (descrito en página 121), previamente determinado bien por simulación (métodos descritos en página 69 y siguientes) o a partir de la determinación del número de Peclet (página 81), la medida de temperatura del pirómetro efectuada en un diámetro de 1.5 mm podría estar alejada del valor del punto mas caliente, si por falta de precisión en la alineación, el área de medida del pirómetro estuviera desplazada respecto de la zona mas caliente.

Se realizan unas medidas en laboratorio, análogas a las descritas en hoja 127 para una fuente extensa, pero ahora interponiendo una chapa con orificios de 0.5 mm, 1 mm, y 1.5 mm, y desplazando lateralmente la chapa (situada sobre una mesa de desplazamiento con tornillos micrométricos) de modo que el área de medida no coincida exactamente con el orificio a través del cual se observa el objeto caliente, se registran las lecturas obtenidas para desalineaciones a uno y otro lado.

Los resultados obtenidos, representados en la figura 4.20, muestran que si la desalineación no es superior a  $\pm 0.5$  mm, para el caso del orificio de 0.5 mm y casi  $\pm 1$  mm, para el caso del orificio de 1.5 mm, la lectura no varía mas de 40 °C en una medida de 600 °C. Lo cual indica que un error en la alineación del pirómetro en  $\pm 1$  mm lleva a un error máximo en la temperatura medida de un 6 %. Además en esta experiencia, al desplazar la chapa perforada se está midiendo en parte la temperatura de la chapa que, por estar alejada de la fuente de calor, se encuentra a temperatura ambiente. En



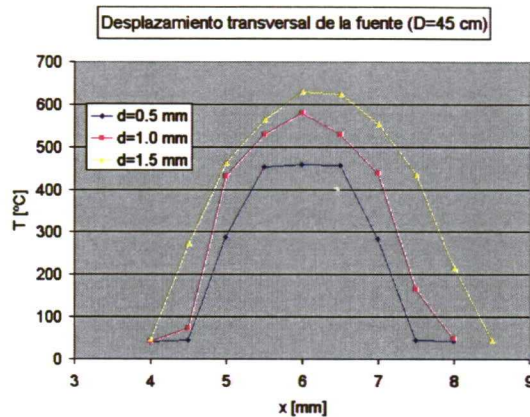


Figura 4.20: *Influencia del desplazamiento del pirómetro respecto del punto mas caliente.*

una medida sobre una chapa bajo tratamiento térmico, este mismo desplazamiento llevaría el área de medida del pirómetro a zonas algo mas frías pero a temperaturas mucho mayores a la del ambiente por lo que este efecto de disminución en el valor medido sería todavía menor que el anteriormente indicado.

#### **Influencia del estado de la superficie**

El estado de la superficie de la pieza puede influir notablemente en la medida proporcionada por el pirómetro. Incluso con el mismo acabado superficial con la misma pintura negra mate, se obtienen diferentes lecturas según el estado de la superficie.

En la práctica se traduce no en que varíe el nivel de la señal media sino que presenta un mayor ruido si la superficie está mas rugosa. Esto nos influye en el sistema de control porque si el ruido es grande puede llegar a provocar oscilaciones en el sistema.

Este aspecto se comentará mas en detalle en el siguiente apartado.

#### **Ruido y filtrado de la señal del pirómetro**

Antes de incorporar el pirómetro como parte de un sistema de control en tiempo real hay que comprobar el ruido existente en la señal procedente del pirómetro para elegir el filtro mas adecuado que por un lado reduzca el ruido a niveles aceptables sin que esto suponga un aumento excesivo en el tiempo de cálculo empleado por el algoritmo de control. Para esto se han tomado registros de la señal del pirómetro en diferentes condiciones que a continuación se comentan.

Se realizaron medidas con tres configuraciones diferentes con una longitud de 10 m de cable en cada caso desde el pirómetro hasta el PC usado para el control. El pirómetro está montado en una caja metálica y el cable sale por un prensaestopas plástico en una configuración y por tubo metálico en otra. Como objeto caliente se utilizó el filamento de una bombilla halógena alimentado con una tensión inferior a la nominal para obtener una temperatura en el entorno de los 1000 °C, del mismo orden de las que se van a utilizar en los procesos de temple.

**Señal con cable paralelo** Utilizando un cable paralelo con pantalla sencilla (con el 50 % de recubrimiento) de 0.5 mm<sup>2</sup> de sección los resultados de las medidas se reflejan en la primera parte de la figura 4.21, donde se observa una amplitud de ruido entre 870 mV y 1170 mV, esto es un total de 190 mV, que correspondería con una variación en la lectura de temperatura de 190 °C, que resulta inaceptable para utilizarla como señal de referencia para el sistema de control ya que podría provocar oscilaciones inadmisibles.

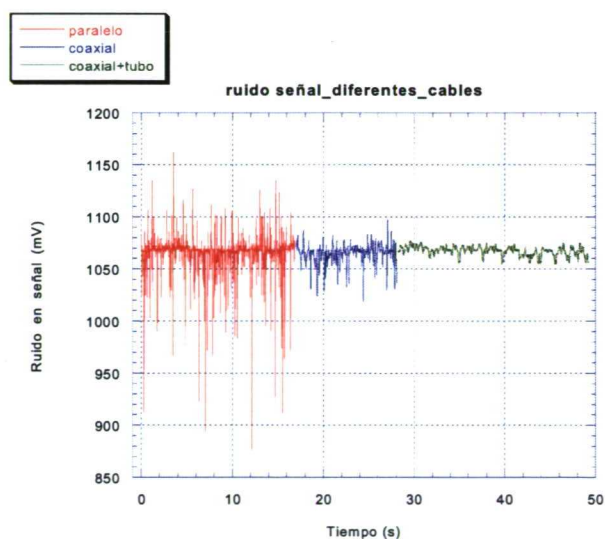


Figura 4.21: Ruido en la señal pirómetro para diferentes cables.

**Señal con cable coaxial al aire** Se utilizó un cable coaxial del tipo RG-58 B/U de 75 Ω. La carcasa del pirómetro se conectó a la masa del PC a través de la pantalla

del cable coaxial. Las medidas se pueden observar en la sección central de la figura 4.21, donde se observa que amplitud del ruido (entre 1020 mV y 1095 mV) es de unos 75 mV.

**Señal con cable coaxial por dentro de un tubo metálico** Se montó el cable coaxial por el interior de un tubo metálico flexible forrado de plástico. La pantalla del coaxial se puso a masa solo en el lado del ordenador y también se conectó en ese mismo lado la parte metálica del tubo. En este caso se obtuvieron las medidas reflejadas en la última sección de la figura 4.21 donde se observa que la variación total en la señal se reduce a tan solo 22 mV.

**Medidas con pirómetro con planta en funcionamiento** A pesar de que en las primeras pruebas en el laboratorio la lectura con cable coaxial y bajo tubo era buena y con poco ruido, en cuanto se llevó el sistema al laboratorio con el sistema láser y la mesa de coordenadas en funcionamiento (con variadores de frecuencia tanto para el control de velocidad de los motores de la mesa como para el blower del láser) y con la longitud de cable necesaria entre el pirómetro y el ordenador destinado al control (sobre 10 m) se encontró que el ruido que captaba el cable llegaba a afectar gravemente e incluso enmascarar la señal. Este valor de ruido en las medidas reales tenía un valor medio de unos 40 mV con picos periódicos de hasta 2.5 V.

Se probaron diferentes formas de llevar la canalización (alejado de cables radiantes: de alimentación, etc.), hasta llegar a la decisión final de utilizar cable coaxial y llevado bajo tubo metálico como mejor solución.

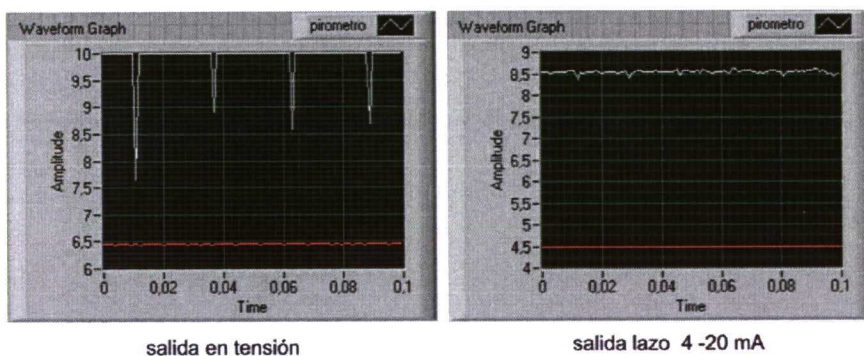


Figura 4.22: Diferencias de ruido en la señal del pirómetro según el tipo de salida utilizada.

Como el pirómetro también dispone de salida en lazo de corriente autoalimentado de 4 mA a 20 mA se decidió finalmente utilizarla por proporcionar una señal mucho menos sensible a los ruidos inducidos en el cable, según se puede apreciar en la comparación de la figura 4.22. Para convertir la señal de intensidad en tensión es suficiente con intercalar una resistencia de precisión de  $249\ \Omega$  en el conector BNC de entrada a la tarjeta. Así el rango de la señal de salida del pirómetro en intensidad entre 4 mA a 20 mA se transforma a la entrada de la tarjeta de una señal en tensión entre 996 mV y 4980 mV (equivalentes respectivamente a unas temperaturas de  $450\ ^\circ\text{C}$  y  $1850\ ^\circ\text{C}$ ). Posteriormente se puede adaptar el nivel de la señal al valor de temperatura dentro del programa de control. Además en caso de rotura del cable que lleva la señal por lazo de corriente, permite detectarlo desde la propia tarjeta de adquisición por la ausencia de señal o señal flotante.

#### Filtrado de la señal del pirómetro

A pesar de haber elegido el sistema de conexionado más adecuado para limitar al máximo el ruido, las propias imperfecciones o la rugosidad de la superficie de la pieza a tratar hace que la señal del pirómetro tenga un ruido de fondo. Era por tanto necesario filtrar la señal ya que no era representativa de las variaciones de temperatura de la superficie sino de las variaciones de su emisividad. Se pensó probar varios tipos de filtros que se pudieran incorporar al algoritmo de control sin afectar demasiado al tiempo de procesado.

Como lo que se pretendía era limitar o evitar picos muy rápidos teniendo en cuenta que debido a la inercia térmica de las piezas no se puede esperar que en los 20 ms que pasan entre dos capturas de datos se pueda dar una variación de temperatura de  $100\ ^\circ\text{C}$  o más, se pensó que la solución más adecuada era incorporar un filtro paso-bajo en la señal de entrada.

Como se verá en el apartado 5.6, en el entorno de programación LabVIEW<sup>®</sup> se puede incorporar fácilmente un filtro de este tipo. Para optimizar el filtrado del ruido propio de la señal y del inducido por la propia frecuencia de muestreo de la tarjeta de adquisición, la frecuencia de corte está ajustada a un décimo de la frecuencia de muestreo elegida.

#### Influencia del ajuste de emisividad en el pirómetro

El pirómetro dispone de un mando giratorio para ajuste de la emisividad. Se realizaron diferentes medidas del ruido presente en la señal del pirómetro para diferentes posiciones de este mando observando que las medidas obtenidas no eran iguales en todos los puntos. Esto puede ser debido al diferente ruido de fondo generado por los compo-



nentes electrónicos que intervienen en el circuito de ajuste, que son diferentes según la posición seleccionada.

Para evitar en lo posible otras fuentes de ruido, en vez de utilizar la bombilla halógena que se usó en el apartado 4.4.1, se fija la salida del pirómetro en 1000 mV realizando un puente entre los terminales 5 y 6 de la regleta T3 del pirómetro (HI LVL GND y CAL).

Se efectuaron registros de la señal recibida desde el pirómetro seleccionando diferentes valores en el ajuste de emisividad entre 0.1 y 0.9 y se calcularon las desviaciones típicas entre los valores instantáneos de la señal y el valor que se supone debía enviar en función del valor de emisividad elegido y del valor de calibración de 1000 mV, representando los valores obtenidos en la figura 4.23.

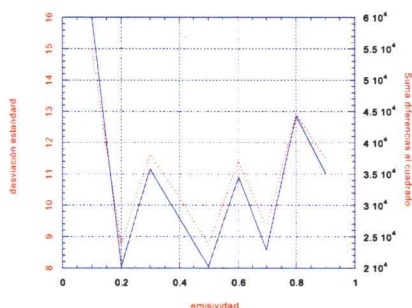


Figura 4.23: *Influencia del ajuste de emisividad en el ruido de la señal del pirómetro.*

Se encontró que se obtiene menor ruido (menor desviación típica respecto el valor teórico) para los valores de emisividad de 0.2, 0.5 y 0.7. Como no interesa tener un factor de corrección muy elevado, se fija el valor de 0.7 como de uso habitual.

Si bien en pruebas realizadas posteriormente, se ha visto que muchos aceros, cuando la superficie es tratada para mejorar la absorción de la radiación incidente, presentan un valor de emisividad en el entorno de 0.50 y 0.55, también se ha visto en el apartado 4.5.1 y siguientes, que la forma mas acertada de determinar la emisividad es comparando la lectura del pirómetro en un proceso que nos lleve a la fusión con el resultado de un modelo numérico. Posteriormente se establecerá el factor de corrección de la lectura del pirómetro por la relación entre la lectura del pirómetro y la real del punto de fusión, relacionadas por el cálculo numérico por simulación.

#### 4.4.2 Control externo de la potencia del láser

El equipo láser de CO<sub>2</sub> disponible en el Laboratorio de Aplicaciones Industriales del Láser del Centro de Investigaciones Tecnológicas del campus de Ferrol, está integrado con un sistema de control numérico (CNC) que gobierna una mesa de coordenadas que facilita el movimiento relativo haz láser-pieza en procesos de corte fundamentalmente, aunque luego se aplique a otros muchos: soldadura, refusión, recubrimientos, etc.

##### Condicionantes de la actuación por seguridad del equipo

Desde ese CNC se coordina el movimiento de la pieza según el recorrido y a la velocidad previamente determinadas, incluyendo la selección del modo de funcionamiento en continuo o pulsado del láser y con las órdenes de encendido y apagado del láser. Además coordina con lo anterior la apertura de la válvula que abre el paso del gas utilizado en el proceso y que además protege la lente de enfoque de posibles proyecciones. Sobre todo esto se superpone también la supervisión de las alarmas tanto del sistema eléctrico-electrónico de la mesa de coordenadas, como las del sistema láser.

El sistema láser permite el control de potencia tanto a través de unas entradas digitales, que son las que normalmente utiliza la interconexión con el CNC, como a través de una entrada analógica externa de 0 V a 10 V, que permite variar la potencia desde el 0 % al 100 % de la nominal de forma lineal, según se comprueba en la página 159.

En un primer momento se pensó en montar el sistema de control independiente del programa del CNC, habilitando en el sistema láser el control de potencia desde el exterior a través de la entrada analógica. Así, cuando el CNC hubiese comenzado el programa del movimiento se podría activar el láser y manualmente se activaría el sistema de control, pero de forma totalmente independiente del movimiento. Para parar el proceso habría que dejar que acabase el movimiento y parar rápidamente el control para evitar subidas bruscas de temperatura.

En unas primeras pruebas ya se vieron algunos inconvenientes a este modo de proceder, como son:

1. Si nos adelantamos en activar el control antes de que se active el láser, se acumula mucho error en el lazo integral con lo que intenta pedir máxima potencia del láser para intentar subir la temperatura rápidamente. Como ésta es limitada, cuando se alcanzase la temperatura deseada el desplazamiento efectuado sobre la pieza puede ser grande y sobre todo no es repetible porque la respuesta del regulador depende del tiempo de desfase entre la activación del control y el comienzo de la radiación.

2. Si se activa el láser y el control antes de que comience el movimiento se producirá una elevación brusca de la temperatura y se puede llegar a fundir la pieza en ese punto.
3. Lo mismo ocurre si una vez activado, surge una alarma en el CNC que provoque la parada del mismo, quedando el láser incidiendo sobre un mismo punto de la pieza.
4. Si se activa el láser antes de que se active el gas de proceso y de que comience el movimiento, ambos controlados por el CNC, se puede dañar la lente por proyecciones de material fundido.

Para evitar todos estos inconvenientes y aprovechar la facilidad proporcionada en la coordinación de los diferentes equipos que intervienen en un proceso de tratamiento térmico y por motivos de seguridad, se pensó en hacer el control bajo la supervisión del programa PLC (contando de este modo, con la supervisión de estado y alarmas del sistema ya incluidas en este programa), como se describe a continuación.

#### **Introducción al control numérico. Posibilidad del control a través del PLC**

En la evolución de la automatización de sistemas industriales, el Control Numérico Computerizado (CNC) tiene un lugar destacado como veremos en la evolución histórica. Desde el Control Automático de Procesos, que se refiere al manejo de procesos caracterizados por diversos tipos de cambios (generalmente químicos y físicos); un ejemplo de esto podría ser el proceso de refinado del petróleo. Una vez definido el sistema, es totalmente rígido y un nuevo proceso o variación del anterior obliga a modificar el diseño inicial. También podría tratarse de una máquina que realizase varias funciones, pero siempre las mismas, desde su creación hasta su desgaste.

Le sigue el Proceso Electrónico de Datos frecuentemente relacionado con los sistemas de información, centros de cálculo, etc. Sin embargo en la actualidad también se considera dentro de esto la obtención, análisis y registros de datos a través de interfases y computadores. Sirve, por ejemplo, para detectar, leer códigos de barras, contabilizar, gestionar stocks, etc. En estos sistemas la variación de los datos (por ejemplo, los precios de los productos en un gran área comercial) se puede realizar casi en tiempo real con solo cambiar la base de datos a utilizar. El resto de sistema: lectores de códigos, cajeros, etc., permanecen sin variación alguna.

La Automatización Fija, es aquella asociada al empleo de sistemas lógicos tales como sistemas de relés y puertas lógicas. Se logran importantes ventajas pero son sistemas rígidos: para una sola función. Sin embargo estos sistemas se han ido flexibilizando al introducir algunos elementos de programación como es el caso de los



(PLC's ) ó Controladores Lógicos Programables. Con un mismo sistema y variando el programa introducido en el PLC se pueden realizar diferentes tareas. Un ejemplo de esto podría ser el control total de una minicentral hidroeléctrica, actuando en función del nivel de agua en el canal de entrada para ir abriendo la válvula de paso del agua a la turbina mas o menos hasta alcanzar la velocidad nominal, acoplar el generador a la red, seleccionar cuando puede entrar un segundo generador en función del nivel disponible y el rendimiento de cada generador, conexión automática de condensadores para compensación de energía reactiva, vigilancia permanente de alarmas (temperaturas de cojinetes, presiones de aceite, etc.).

Un mayor nivel de flexibilidad lo poseen las máquinas de control numérico computarizado. Este tipo de control se ha aplicado con éxito a Máquinas de Herramientas de Control Numérico (MHCN). Entre las MHCN podemos mencionar fresadoras CNC, tornos CNC, máquinas de electroerosión, máquinas de corte por hilo, etc.. En una máquina CNC, a diferencia de una máquina convencional o manual, una computadora controla la posición y velocidad de los motores que accionan los ejes de la máquina: controla el movimiento de la mesa, el carro y el husillo. Gracias a esto, puede hacer movimientos que no se pueden lograr manualmente como círculos, líneas diagonales y figuras complejas tridimensionales.

Una vez programada la máquina, ésta ejecuta todas las operaciones por sí sola, sin necesidad de que el operador esté manejándola. El programa PLC del control numérico realiza una serie de funciones de supervisión y control además de atender a las llamadas de los movimientos (selección del eje, sentido, control de la velocidad y desplazamientos) programados en el programa del CNC.

Además, el programa PLC interpreta las funciones  $M^9$  que aparecen en el programa del CNC. Puede leer señales tanto analógicas como digitales en sus diferentes entradas, almacenarlas temporal o permanentemente en registros, hacer operaciones aritméticas con ellas y una vez convertidas al formato deseado, ponerlas en una salida determinada, en el instante que se necesite. También puede condicionar la lectura o escritura a que se den determinadas condiciones o limitar los valores máximos o mínimos de las señales a escribir en los buffer de salida.

Esto nos proporciona una multitud de posibilidades a la hora de sincronizar los diferentes procesos: movimiento de la pieza, activación-desactivación del láser, activación y desactivación del sistema de control, control permanente de alarmas en los equipos (láser, sistema de refrigeración, suministro de aire comprimido, alimentaciones eléctricas y mesa de coordenadas) que necesitamos para llevar a buen término un determinado proceso y poder repetirlo en las mismas condiciones cuantas veces necesitemos.

---

<sup>9</sup>Funciones definidas por el usuario en el PLC que pueden ser llamadas desde el programa CNC.



### Programa desarrollado para el control externo de potencia

Aquí se comenta la estructura general del programa PLC y las modificaciones efectuadas en el programa, así como las consecuencias que generan en el funcionamiento de la máquina.

Según páginas 27 y 28 del manual [FAGOR 1997], el armario de control del láser admite una señal analógica para control de potencia externa comprendida entre 0 V y 10 V (conector X44 del ordenador del armario control láser, pines 11 (+) y 12 (-)). Por otro lado el PLC dispone de entradas analógicas libres de rango  $\pm 5$  V (conector X7 del armario eléctrico, pines 3 (+), 10 (-)) y salidas analógicas libres de rango  $\pm 10$  V (conector X8 del armario eléctrico, pines 6 y 14).

Se trata de que el programa del PLC lea periódicamente la señal analógica que manda la tarjeta de adquisición de valores entre 0 V y 10 V, la guarde en un registro en formato digital, compare este registro con el anterior, si es igual mantenga el que tenía, si es mayor lo modifique y lo ponga en el registro de salida después de pasarlo a formato analógico. Si es menor también lo modifique y lo ponga en la salida.

**Funcionamiento del programa PLC** Para poder realizar lo dicho en el párrafo anterior es necesario tener una idea de como funciona el programa del PLC. El programa del PLC consta de una serie de módulos definidos mediante proposiciones DIRECTIVAS. Los módulos que pueden formar el programa comienzan con la proposición directiva que lo define (CY1, PRG, PE) y terminan con la proposición directiva END y son:

- Módulo del primer ciclo (CY1)

Sólo se ejecuta la primera vez que se pone en marcha el autómatas. Sirve para inicializar diferentes recursos y variables con sus valores iniciales antes de ejecutar el resto del programa. Borra todas las marcas, salidas y registros. No es necesario que esté situado al comienzo del programa ya que CY1 es lo primero que busca al comenzar.

- Módulo principal (PRG)

Contiene el programa de usuario y se ejecuta cíclicamente. Es el encargado de analizar y modificar las entradas y salidas del CNC. Su tiempo de ejecución máximo está limitado a 100 ms en el parámetro máquina del PLC "WDGPRG". El tiempo de ciclo real depende del volumen total de instrucciones con que cuente el programa PRG. En este caso este tiempo es de  $31 \pm 9$  ms, tomando los valores medios y desviación típica sobre 30 medidas realizadas sobre el tiempo transcurrido entre la entrada de un pulso de entrada en el conector X7 del armario del CNC y su salida por el conector X8.

- Módulo de ejecución periódica (PEt)

Se trata de un módulo opcional. Se ejecuta cada periodo de tiempo  $t$  indicado en la proposición directiva de definición del módulo dentro del programa PLC (32 ms). Si este módulo se está ejecutando y actúa sobre una salida física, ésta se actualiza al final de la ejecución del módulo periódico.

Normalmente se usa para tareas que no necesitan ser evaluadas en cada ciclo del PLC, pero también para aquellas tareas críticas que necesiten un periodo de refresco concreto como es, en nuestro caso, el que controla la actuación del seguidor para mantener constante la distancia cabezal-pieza. Si no está activado nunca se ejecuta.

**Orden de ejecución de los módulos** Cada vez que se arranca el programa del PLC (comando RUN) el primer módulo que se ejecuta es el módulo de Primer Ciclo (CY1). Una vez finalizada su ejecución se continuará con el módulo Principal (PRG). El módulo Principal se ejecutará periódicamente hasta que se detenga la ejecución del PLC (comando STOP).

El módulo Periódico se ejecutará cada vez que trascurra el tiempo indicado en la proposición directiva "PEt", comenzando dicha cuenta al empezar la ejecución del módulo principal. Cada vez que se ejecuta este módulo se interrumpe la ejecución del Principal, continuando la ejecución del mismo tras finalizar la ejecución del Periódico. Su tiempo de ejecución máximo está limitado por el valor indicado en el parámetro máquina del PLC "WDGPER".

Por ejemplo, PE 10 define el comienzo del módulo Periódico PE que se ejecutará cada 10 ms.

**Recursos de PLC** Los recursos de PLC son los siguientes:

- Entradas.

Son elementos que proporcionan información al PLC de las señales que se reciben del exterior. Se representan mediante la letra I seguida del número de entrada que se desea referenciar, por ejemplo I1, I25, etc. El PLC puede controlar hasta 256 entradas, estando reservadas para supervisión y control de ejes las 128 primeras.

- Salidas.

Son elementos que permiten al PLC activar o desactivar los distintos dispositivos o accionamientos del armario eléctrico. Se representan mediante la letra O seguida del número de salida que se desea referenciar, por ejemplo O3, O45, etc. El PLC puede controlar 256 entradas, estando reservadas para la supervisión y control de ejes las 64 primeras.

- Marcas

Son elementos capaces de memorizar en un bit la información definida por el usuario, permaneciendo inalterable su valor incluso eliminando la alimentación al sistema. Se pueden poner a cero con un comando RES (restore) =0.

Se programa con la letra M seguida del número de marca que se desea referenciar, por ejemplo M1, M25, etc.

- Funciones auxiliares M.

Son funciones que se definen en el bloque de ejecución y que pueden ser llamadas desde un programa residente en el CNC. Este programa contendrá además, la definición de parámetros de velocidad, tipo de pulso y la definición del recorrido, junto con las ordenes de activar gas de proceso y posterior permiso de rayo. En este caso se añadió la M130 para el control de potencia externa mediante señal analógica.

- Registros.

Son lugares donde se pueden almacenar: escribir y leer, asignando valores numéricos

**Programa de control numérico** El programa de control numérico utilizado para realizar una pasada recta bajo control de potencia externa se resume en las siguientes instrucciones:

```
%EXT PWR CONT,MX,  
N10 G91 ; programacion de coordenadas incrementales  
N15 G92 X0Y0 ; asigna a la posicion actual del cabezal las coordenadas  
;indicadas  
N20 G72 S1; parametro de escala 1:1  
N65 (P120=84) ; activacion solenoide que permite paso de  
;gas de proceso (N2, He, etc)  
N30 (P101=300); VELOCIDAD (300 mm/mm, en este ejemplo)  
N45 (P110=102) ; seleccion PULSO (el tipo se elige en el armario de  
;control del laser, bajo pulso num. 2 en el ejemplo)  
N80 (CALL 83); llamada a subrutina 83 (ver mas abajo)  
M80; permiso rayo  
G4 K25; retardo  
G1X35; recorrido de 35 mm en el eje X  
(CALL 91); llamada a subrutina de apagado laser  
M30
```

Para un tratamiento con movimiento circular basta introducir la activación del cuarto eje con el comando M94 y cambiar la línea donde pone G1X35 por G1 U720 X40 (por ejemplo) que define un ángulo total girado de  $720^\circ$  para un desplazamiento de 40 mm en el eje X. El parámetro correspondiente a la velocidad lineal hay que calcularlo en función del diámetro de la pieza.

Desde un programa del CNC se puede llamar a una determinada función M que realice lo que nosotros queremos y en el momento preciso. En este caso el programa CNC llama a la subrutina 83 que sigue a continuación:

```
(SUB 83);SUBR. CONTROL POTENCIA EXTERNO
MP120 ; activa gas proteccion definido en programa anterior
G4 K25
MP110 M130; seleccion de tipo de pulso y nivel en este caso a traves de
      ;la funcion de nivel 130
G5
FP101 ; limita velocidad al valor determinado en programa CNC
(RET)
```

**Modificaciones al programa PLC** Dentro del programa PLC las modificaciones efectuadas fueron las siguientes:

- Definición de marca principal DEF M>PWREXTCONT M906
- En las definiciones de niveles de potencia se añadió \$130
- Se incluyó el nuevo nivel como el n°6
- Puesta a cero de todas las marcas correspondientes a niveles de potencia excepto la \$130 cuando ésta está activa:

```
DFU MSTROBE AND CPS MBCD* EQ $130 ; cuando detecta flanco de subida de
      ;la marca y activa $130
=RES LEVEL1 =RES LEVEL2 =RES LEVEL4 =RES M>POWER =RES M>POWER1
=SET M>PWREXTCONT =SET EXTPOWER =ERA M901 905 ; M>POWER 0-5=0
```

- Definición y control de la función de nivel para control externo de potencia (M130):

```
;*****
; CONTROL EXTERNO DE POTENCIA (M130)
;*****
```



```

DFU M>PWREXTCONT ; se pone otra vez para que solo la ponga a cero la
;primera vez que realiza el ciclo
= MOV 0 RBASURA 0032 ; pone a cero el registro llamado RBASURA
= CNCWR(RBASURA,ANA06,M1) ; convierte a analogico el valor existente
;en el registro anterior y la escribe en salida analogica ANA06
M>PWREXTCONT ; (se pone esta linea para que a cada vuelta del programa
;PLC actualice seg\UNICODE{Oxfa}n la entrada existente)
= CNCRD(ANA13,RPOWER,M1) ; lee la entrada analogica 3, la digitaliza y
;se la asigna como valor de nivel a RPOWER
= MLS RPOWER 1 RPOWER ; multiplica el valor anterior por uno y actualiza
;el nuevo valor de RPOWER. En muchas tarjetas las salidas son de 5 V
;en estos casos se multiplicaria por dos para cubrir el rango total.
; Las sentencias siguientes previenen de oscilaciones entre el 100 por
; cien y el 0 por cien de potencia cuando se sobrepasa el valor de 10 V
; en la senal que suministra el PC de control (por un ruido en la linea
; cuando se esta pidiendo maxima potencia 10 V, por ejemplo)
M>PWREXTCONT AND CPS RPOWER LT 0000099425 ; si es menor al equivalente
;a 9.9 V, asigna a RPOWER el resultado de la entrada ANA13
= CNCWR(RPOWER,ANA06,M1) ; Escribe el valor final de RPOWER en la salida
;analogica 6
M>PWREXTCONT AND CPS RPOWER GT 0000099425 ; si es mayor asigna a RPOWER
;una salida fija de 9,9 V, que corresponde con el 99,2 por cien de
;la potencia laser
= CNCWR(RPOWER,ANA06,M1)
;las tres siguientes hacen que al finalizar el programa de control
,numerico la salida analogica quede a cero y no al ultimo valor
DFD M>PWREXTCONT; al detectar el flanco de bajada de la marca, esto es,
;al finalizar el programa CNC
= MOV 0 RBASURA 0032 ; asigna el valor cero al registro RBASURA
= CNCWR(RBASURA,ANA06,M1) ; pone ANA06=0 ;

```

#### Sincronización del inicio del control con comienzo de la radiación láser

En la página 136 ya se comentaron los inconvenientes de la falta de coordinación entre el momento del inicio del sistema de control con el momento de comienzo de la irradiación láser sobre la pieza bajo tratamiento. Para evitarlos, se consideró utilizar las entradas y salidas digitales que tiene la tarjeta de adquisición y buscar qué señales estaban disponibles en el armario del resonador que caracterizaran el momento en que el resonador comenzaba a irradiar.

En los terminales 310 y 311 de la regleta X63 del armario del resonador, se dispone de un contacto cerrado cuando el obturador se abre. Como esta condición es necesaria para que comience la irradiación se pensó en utilizar como señal de disparo para la tarjeta de adquisición. Sin embargo, la presencia de esta señal no implica necesariamente que la radiación comience inmediatamente, ya que en el programa del CNC suele haber varias líneas posteriores, como pueden ser la activación de un gas de proceso, tiempo de retardo para dejar que se establezca el flujo de salida del gas por la boquilla, etc. Esto podría llevar varios milisegundos de actuación del regulador sin presencia de radiación sobre la pieza con la consiguiente acumulación de error que influiría en el funcionamiento del regulador.

Posteriormente se pensó utilizar la señal presente en los terminales 1 y 3 de X44 (en el mismo armario) en los que el CNC pone una tensión de 24 V cuando comienza el movimiento de la pieza sobre la mesa de coordenadas. Esta señal es la que habilita la lectura de la consigna de potencia externa que se introduce por los terminales 11 y 12 de la misma regleta y que el láser entrega de forma casi inmediata.<sup>10</sup>

Utilizando esta señal se consigue que el láser nunca llegue a irradiar sobre una pieza en reposo a la vez que se activa el control cuando el láser está disponible para irradiar. De forma análoga, cuando se para el movimiento, se para la irradiación a la vez que se desactiva el control.

En la práctica se monta un relé que se activa con la señal de 24 V, que cierra un contacto que une una señal de +5 V disponible en la caja de conexiones coaxial de la tarjeta de adquisición con la entrada/salida digital DIO0. Para que esta señal active y desactive el programa de control debemos hacer además un puente entre las entradas/salidas digitales DIO3 y DIO4. Esta última conexión facilitaría intercalar una seta de emergencia para parar el tratamiento (radiación láser y control) en caso de emergencia y que se instalaría en las inmediaciones de la situación del operario de la máquina durante los tratamientos.

## 4.5 Caracterización experimental de la temperatura y la distribución de potencia

### 4.5.1 Métodos para la determinación de la absorción superficial

Conocer el valor de la absorción superficial del material a tratar es fundamental tanto para realizar cualquier tipo de simulación numérica previa al tratamiento como para corregir el valor de la señal eléctrica suministrada por el pirómetro y poder relacionarla con el valor de temperatura real de la superficie que se va a utilizar como señal de

<sup>10</sup>El manual del fabricante asegura un retardo máximo de 1.5 ms.

entrada al sistema de control como valor representativo del estado real del proceso y poder actuar en consecuencia aumentando o reduciendo la potencia entregada por el sistema láser.

La absorptancia superficial de un material a la radiación de una longitud de onda determinada puede ser medida de forma teórica o experimental.

### Métodos teóricos

El cálculo teórico se puede hacer a partir de las propiedades ópticas del material, basándose en los índices de refracción del material, o bien a través de la conductividad eléctrica del material [OLSEN 1988]. Así, para el primer método, [PROKHOROV 1990] relaciona el índice complejo del material con la reflectancia, ecuación 4.6, para el caso de un ángulo de incidencia normal a la superficie :

$$R = \frac{(n - 1)^2 + k^2}{(n + 1)^2 + k^2} \quad (4.6)$$

El principal inconveniente de estos métodos es el desconocimiento teórico del comportamiento y datos sobre las propiedades de los materiales a altas temperaturas. Otro inconveniente importante es que los materiales utilizados en la industria son aleaciones lo que dificulta encontrar datos fiables de sus propiedades en la bibliografía. También hay que tener en cuenta que las superficies de los materiales presentan defectos geométricos (como poros o rugosidades) y defectos químicos (como oxidaciones o impurezas), lo cual puede producir desviaciones importantes respecto al comportamiento teórico.

### Métodos experimentales

Básicamente hay dos métodos: El cálculo calorimétrico y la medida directa de la reflectancia de la superficie. Un tercer método está basado en la comparación de la evolución de la temperatura superficial obtenida por simulación numérica a partir de las propiedades termofísicas del material y de la comparación de estos resultados con los valores obtenidos en un proceso experimental se deduce el valor de absorptividad que me hacen compatibles ambos resultados. Las ventajas e inconvenientes de cada uno de estos métodos se describen a continuación.

El experimento calorimétrico es sencillo de realizar, pero su fiabilidad es baja [RAMOUS 1992]. La medida directa de la reflectancia superficial presenta el inconveniente de la existencia de radiación difusa, lo que obliga a medir toda la radiación reflejada en la superficie con dispositivos esféricos [FABBRO 1987], [GASSER 1987], que recojan toda la intensidad reflejada desde la superficie. En segundo lugar, como



$A = 1 - R$  y  $R$  suele tener valores cercanos a la unidad, hay que precisar mucho en la medida del valor de la reflectancia superficial, ya que una diferencia entre 0.98 y 0.99 en el valor de  $R$ , supone el doble en términos de absorptancia.

**Procedimiento calorimétrico a baja temperatura** Se ha realizado un experimento calorimétrico. Por un lado se preparó una pieza de material de volumen conocido y con la misma preparación superficial que el resto de las probetas utilizadas en experimentos posteriores y se irradió durante un determinado tiempo con una potencia láser conocida. Se mide la temperatura final con ayuda de un termómetro de contacto y se calcula por calorimetría el porcentaje de energía absorbida, estimando así la absorptividad de la superficie. Se realizó un experimento a baja temperatura, calentando con láser una probeta de F114 con el mismo acabado superficial que las que luego se van a tratar y de dimensiones 30 mm x 25 mm x 6 mm, con potencias láser de 200 W, 100 W, 50 W durante tiempos de 5 s, 10 s, 20 s, respectivamente. A la vez se toma la temperatura alcanzada por la probeta con un termómetro de contacto que dispone de una sonda cuadrada de acero inoxidable de dimensiones 20 mm x 20 mm x 3 mm, montado según la figura 4.24.

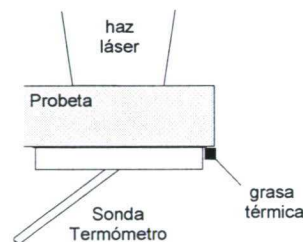


Figura 4.24: Disposición del experimento para método calorimétrico.

Este método tiene algunos problemas. Primero, no se puede realizar a temperaturas mas altas de 120 °C para no descomponer la grasa térmica intercalada entre la probeta y la pieza. El termómetro de contacto tiene una inercia térmica elevada con lo que hay que elegir la potencia láser de modo que el calentamiento tenga lugar en un tiempo total del mismo orden que el tiempo de subida característico del termómetro. Además parte de la energía entregada por el láser se emplea en subir la temperatura del extremo de la sonda. Aparte de estas consideraciones, mientras la temperatura es baja se pueden despreciar las pérdidas de calor por convección y radiación en el balance calorimétrico. Si se realizan a temperaturas de varios cientos de grados por un lado las pérdidas antes mencionadas ya no son despreciables y sobre todo, que el gradiente de temperaturas



entre la cara donde incide el láser y la opuesta, donde se realiza la medida puede ser muy grande y las medidas del termómetro dejan de ser representativas.

Los datos de propiedades para la probeta y el extremo de la sonda son los de la tabla 4.2.

Tabla 4.2: *Propiedades de la probeta y el extremo de la sonda.*

Propiedades del material	
densidad del acero	$\rho_{ac} = 7850 \text{ kg m}^{-3}$
capacidad calorífica acero	$(C_p)_{ac} = 500 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$
Propiedades de la sonda	
densidad sonda	$\rho_{son} = 7800 \text{ kg m}^{-3}$
capacidad calorífica sonda	$(C_p)_{son} = 460 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$
Parámetros del proceso	
Temperaturas iniciales ( $^{\circ}\text{C}$ )	21, 22 y 21
Temperaturas finales ( $^{\circ}\text{C}$ )	45, 45 y 46

La expresión 4.7, relaciona la energía necesaria en función de la absorptividad del material y la energía láser entregada con el salto de temperaturas entre valores final e inicial,

$$E_{abs} = \alpha E_{laser} = [m_{ac} (C_p)_{ac} + m_{son} (C_p)_{son}] \Delta T \quad (4.7)$$

Partiendo de una temperatura inicial de 21  $^{\circ}\text{C}$ , 22  $^{\circ}\text{C}$  y 21  $^{\circ}\text{C}$ , se han obtenido unas temperaturas finales de 45  $^{\circ}\text{C}$ , 45  $^{\circ}\text{C}$  y 46  $^{\circ}\text{C}$  respectivamente. Los resultados de los cálculos en función de la energía total entregada (1000 J en los tres casos) y los datos del material proporcionan unos valores de absorptividad de 0.53 ; 0.51 ; 0.55.

Como sabemos que la absorptividad de los materiales varía con la temperatura, los valores obtenidos por este método pueden no ser válidos dependiendo de cuanto varíe este parámetro con la temperatura ya que los procesos de temple tienen lugar a temperaturas mucho mayores. Por este motivo se realizó otro experimento a mayor temperatura (para validar los valores obtenidos) y que se describe a continuación.

**Procedimiento comparativo a alta temperatura** En este caso se compara directamente la medida de un termómetro de contacto con la del pirómetro. Con la misma disposición de la figura 4.24 pero sustituyendo la capa de grasa térmica por una lámina de mica. Por un lado, esto nos amplía el rango de temperaturas de trabajo hasta la de degradación de la mica (calcinación) que está entre 700  $^{\circ}\text{C}$  y 1000  $^{\circ}\text{C}$  dependiendo del origen de la mica. Por otro lado nos obliga a mecanizar tanto la cara de la probeta en contacto como la superficie del extremo de la sonda y mantener la unión bajo presión para asegurar una buena transmisión de calor. Así mismo, reducimos el espesor de

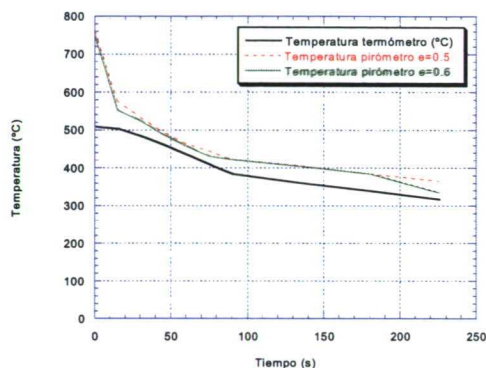


Figura 4.25: Lecturas comparativas pirómetro-termómetro a diferentes valores de emisividad.

la probeta a 2 mm para disminuir el gradiente entre ambas caras y aplicamos una potencia reducida con un diámetro de haz que abarque casi toda la superficie de la probeta.

El procedimiento seguido es el siguiente: se aplica la potencia láser hasta que se obtiene una lectura del pirómetro de 800 °C. Se apaga el láser y se registran las temperaturas de pirómetro y termómetro hasta que sean estables y descendiendo. Como el pirómetro dispone de un ajuste de emisividad, realizamos diferentes pruebas tratando de igualar la lectura del pirómetro con la del termómetro.

Realizadas varias pruebas se llega a la gráfica de la figura 4.25 donde se puede apreciar que la respuesta del termómetro después de la inercia inicial, ya comentada, se parece mucho a la del pirómetro cuando en este se selecciona el ajuste de emisividad en un valor de 0.5 teniendo en cuenta que la indicación del termómetro que se corresponde con la de la cara inferior siempre va a estar por debajo de la temperatura de la cara superior, lo que parece confirmar el orden de magnitud de los valores obtenidos por el método calorimétrico. Como ya se vió (página 134 y siguientes), no es recomendable ajustar el pirómetro en este valor de emisividad debido al nivel de ruido presente en la señal entregada por el pirómetro, ya que este no presenta el mismo nivel de ruido en todas las posiciones de emisividad seleccionables.

**Otro procedimiento comparativo a alta temperatura** También se intentó evaluar la medida del pirómetro mediante un experimento donde se compara la temperatura del filamento de una bombilla [PRASAD 1978],- [WAGNER 1991], obtenida midiendo la resistencia del filamento de tungsteno con los datos de temperatura para este material

y los obtenidos directamente con el pirómetro.

Alimentando la bombilla con una fuente de alimentación variable se consiguen diferentes estados de temperatura del filamento. Cuando la bombilla alcanza un valor estable, la potencia eléctrica disipada en el filamento debe ser igual a la tasa de pérdida de calor del filamento. De los tres posibles mecanismos de transferencia de calor y debido a que el filamento está dentro de un globo de cristal con determinado grado de vacío en su interior, se puede estimar que la mayor parte de la energía sólo se pierde por radiación a través del cristal de la bombilla y es igual a la energía eléctrica  $P_{el} = VI$ . Midiendo los valores de tensión e intensidad se puede determinar mediante la ley de Ohm la resistencia del filamento. A la vez se toman medidas de la señal entregada por el pirómetro. Comparando los valores de resistencia medidos con la temperatura obtenida a partir de tablas que relacionan la temperatura del tungsteno con su resistencia eléctrica, se puede determinar un valor de emisividad del filamento y utilizar este valor para obtener la indicación del pirómetro más cercana a la realidad.

Pero como se comentó antes, la emisividad depende de la temperatura (para otra temperatura obtengo otro valor de emisividad) y también del propio material emisor (el del filamento) y por tanto este experimento servirá para medidas de las temperaturas del filamento de tungsteno pero en absoluto extrapolables para las efectuadas en otro material por lo que se descarta este método para el fin que se persigue.

Además el hecho de medir la radiación emitida por el filamento a través del cristal de la bombilla (que absorbe parte de la radiación infrarroja) hace que las medidas del pirómetro sean siempre inferiores a las calculadas a partir de la resistencia.

**Procedimiento de la temperatura del cambio de fase** Por un lado se ha realizado un estudio similar al desarrollado en [AMADO 2003], [YAÑEZ 2003] con el código de elementos finitos de ANSYS<sup>®</sup> para determinar el coeficiente de absorción en fase sólida, particularizado aquí para acero F114. Para ello se ha seguido el método que se describe a continuación, que consiste en registrar la evolución de la temperatura máxima superficial en un proceso en el que se alcance la fusión. Posteriormente se compara con los valores obtenidos con el código de elementos finitos de ANSYS<sup>®</sup> para diferentes valores del coeficiente de absorción. Determinar el valor de este coeficiente que iguala los valores de la temperatura real es el objetivo.

Los parámetros de este tratamiento son los de la tabla 4.3:

Tabla 4.3: *Parámetros del tratamiento.*

Potencia	2250 W
Vel. relativa	10 mm / s
Anchura del modo ( $\omega$ )	3 mm

Primero se realiza una medida con el pirómetro tomando la lectura de la temperatura máxima superficial (ver figura 4.26). En ella se observa una transición asociada al cambio de fase sólido-líquido de la muestra. El instante de tiempo que en tiene lugar

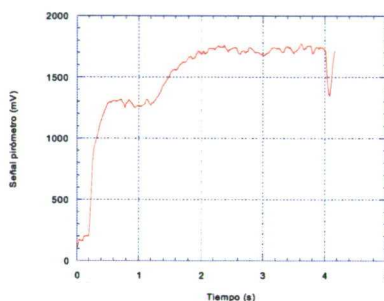


Figura 4.26: *Lectura del pirómetro.*

esta transición es, para este caso,  $t_{fus} \simeq 1.2$  s.

En segundo lugar se realiza la simulación en ANSYS. En la simulación FEM del tratamiento láser, se ha introducido una modificación de forma que pueda introducirse un coeficiente de absorción de potencia láser distinto para la fase sólida  $\alpha_s$  y líquida  $\alpha_l$  de la muestra. En otras palabras, aquellos elementos que durante el tratamiento presenten una temperatura menor que la temperatura de fusión absorberán una potencia  $\alpha_s \cdot P$  y aquellos que hayan superado dicha temperatura absorberán  $\alpha_l \cdot P$ .

En el caso de que  $\alpha_l > \alpha_s$ , es decir, que la fase líquida absorba mayor cantidad de potencia que la fase sólida, la evolución de la temperatura máxima superficial de la pieza dada por la simulación es similar a la observada experimentalmente, en el sentido que en la simulación también se observa una transición en la temperatura en el momento que la probeta empieza a fundir.

Cuanto mayor sea la potencia absorbida por fase sólida más pronto se efectuará esta transición. Todo esto puede verse en la figura 4.27, donde se muestra la evolución de la temperatura máxima para distintos valores del coeficiente de absorción  $\alpha_s$ . Para todos ellos se ha supuesto para la fase líquida  $\alpha_l = 90$  %.<sup>11</sup>

Extrayendo de cada curva de la figura 4.27 el instante  $t_{fus}$  en que se funde el material y representándolo frente al coeficiente de absorción  $\alpha_s$  correspondiente, se obtiene la figura 4.28.

De ésta se deduce que para que la transición ocurra en  $t_{fus} = 1.2$  s la fracción

<sup>11</sup> Este valor se ha introducido arbitrariamente. Se ha comprobado que no tiene ningún efecto en el instante de tiempo en que se produce la fusión del material. En todo caso, afectaría a la evolución de la fase líquida.



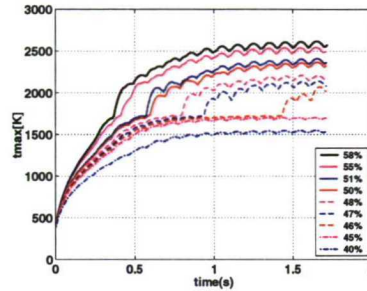


Figura 4.27: Evolución de la temperatura para diferentes valores de absorción de la fase sólida.

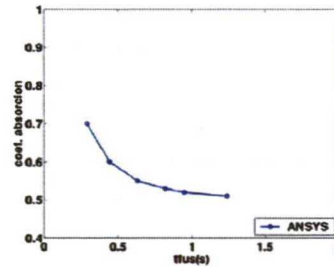


Figura 4.28: Coeficiente de absorción frente al tiempo transcurrido hasta la fusión.

de potencia absorbida por la probeta de F114 debe estar en el entorno del 51 %. Sin embargo se debe tener en cuenta que según la figura 4.28 en la zona entre el 50 % y el 60 % pequeñas variaciones en el valor de la absorción producen tiempos de fusión bastante diferentes. Estas posibles variaciones de la absorción son realmente posibles debido a la influencia del estado de la superficie (rugosidad, pequeños poros, rayaduras, etc.). En este caso el valor de  $\alpha_s=51\%$  bien podría oscilar entre un 50 % y un 55 %.

Realizando la simulación para un valor de  $\alpha_s=51\%$  y representándolo frente a la señal del pirómetro corregida según  $T = (1.14 \times (\text{señal en mV}) + 300 \text{ K})$  para adaptar la señal al valor de la temperatura de fusión del material ( $1450^\circ\text{C}$ ), se obtiene la figura 4.29, donde se obtiene un tiempo de transición a la fase líquida similar en ambos casos.

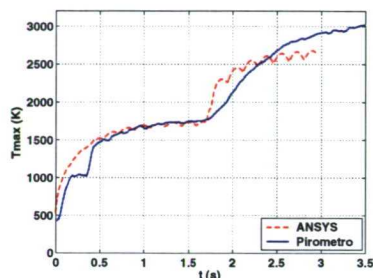


Figura 4.29: Comparación de la evolución de temperatura máxima por simulación para  $\alpha_s=51\%$  y la dada por el pirómetro.

#### Otras consideraciones sobre la determinación de la emisividad

- Otras pruebas que se puedan plantear deberán tener en cuenta de realizar el ensayo a una temperatura al menos  $10\text{ }^{\circ}\text{C}$  por encima de la temperatura ambiente: En caso contrario los efectos complementarios de la emisión y la reflexión no permitirán determinar la emisividad correcta.
- La precisión de la emisividad calculada está en relación con la precisión del termómetro utilizado en el método de la comparación pirómetro-termómetro y de la fiabilidad suficientemente contrastada de la comparación simulación numérica-experimento real.
- Si es posible, se tratará de realizar los ensayos a la temperatura a la que estará la superficie en las condiciones del tratamiento específico que se quiera controlar, para evitar los efectos de las variaciones de la emisividad con la temperatura.
- Hay que tener en cuenta que la emisividad puede ser distinta para diferentes longitudes de onda, lo que influye en la elección de la banda espectral del pirómetro. En general, la elección entre sistemas de onda corta (SWB) (trabajando en la región de  $2\text{ }\mu\text{m}$  a  $5\text{ }\mu\text{m}$ ) y sistemas de onda larga (LWB) (trabajando en la región de  $8\text{ }\mu\text{m}$  a  $13\text{ }\mu\text{m}$ ) se realiza asignando equipos de onda larga para medida a bajas temperaturas, mientras que los equipos de onda corta se dedican para alta temperatura.

Hay, sin embargo, otros condicionantes físicos y tecnológicos a tener en cuenta:

- Emisividad espectral: Es conveniente usar la banda donde la emisividad espectral es más elevada, normalmente la banda de  $8\text{ }\mu\text{m}$  a  $13\text{ }\mu\text{m}$ .

- Contraste térmico: La banda de  $2\text{ }\mu\text{m}$  a  $5\text{ }\mu\text{m}$  presenta una sensibilidad diferencial 2.2 veces mayor que la de  $8\text{ }\mu\text{m}$  a  $13\text{ }\mu\text{m}$ .
- Efecto de las reflexiones: Los sistemas de  $2\text{ }\mu\text{m}$  a  $5\text{ }\mu\text{m}$  tienden a captar con más facilidad las reflexiones solares, mientras que los sistemas de  $8\text{ }\mu\text{m}$  a  $13\text{ }\mu\text{m}$  son mas sensibles a las radiaciones de baja temperatura del entorno.
- Sensibilidad: Los sensores utilizados en onda corta ( $2\text{ }\mu\text{m}$  a  $5\text{ }\mu\text{m}$ ) tienen una sensibilidad típica de hasta siete veces superiores a los empleados en onda larga ( $8\text{ }\mu\text{m}$  a  $13\text{ }\mu\text{m}$ ).
- Precisión de la medida: Aunque los equipos actuales tienen una alta precisión, en caso de variaciones en la emisividad, la distancia o la temperatura ambiente considerada, los sistemas de  $2\text{ }\mu\text{m}$  a  $5\text{ }\mu\text{m}$  son menos sensibles a estos cambios, proporcionando una mayor precisión. De aquí, se decidió escoger un pirómetro que trabaja en esta banda, mas en concreto entre  $2\text{ }\mu\text{m}$  y  $2.5\text{ }\mu\text{m}$ .

### Consideraciones finales

Otro factor a tener en cuenta en la emisividad es que la distribución direccional de la radiación puede ser diferente de la difusa. En superficies no ideales, la emisividad puede tomar diferentes valores, según se esté interesado en una longitud de onda determinada (propiedad momocromática) o en una dirección de terminada del espacio (propiedad direccional). Aparece así el concepto de emisividad direccional monocromática de una superficie  $\varepsilon_{\lambda,\theta}(\lambda, \theta, T)$ , dependiente de la longitud de onda, al ángulo formado con la vertical y la temperatura de la superficie emisora [TOULOUKIAN 1990].

En general, se ha de tener en cuenta que la emisividad depende, en gran medida, de la naturaleza de la superficie que puede estar influida por el método de fabricación, ciclo térmico y reacción química con su medio. Por lo tanto, la temperatura suministrada por el pirómetro no se debe considerar como una medida absolutamente exacta sino, como un método de medida de magnitudes relativas [MOLPECERES 2002], suficiente para conseguir un sistema de monitorización de datos para su uso como señal de entrada a un sistema de control.

Normalmente los dispositivos pirométricos se calibran para un cuerpo negro e incorporan un sistema de corrección de la emisividad que debe ajustarse a las características de la superficie a tratar. En esta tesis se han adoptado las siguientes simplificaciones:

- No se tiene en cuenta las posibles variaciones de la emisividad con la longitud de onda, debido a que el pirómetro trabaja en una estrecha banda y en la parte baja del espectro electromagnético (entre  $2\text{ }\mu\text{m}$  y  $2.5\text{ }\mu\text{m}$ ).

- En cuanto a la dependencia de la emisividad con la temperatura, conviene recordar que una vez encontrado, mediante los ensayos previos realizados, un valor de emisividad para la temperatura del proceso, las posibles variaciones posteriores durante el tratamiento, no producirán errores considerables ya que si atendemos a la ley de Stefan-Boltzmann, la radiación es proporcional a la cuarta potencia de la temperatura y solamente lineal con la emisividad. Por tanto, un pirómetro trabajando en longitudes de onda pequeñas es mucho mas sensible a cambios en la temperatura que a cambios en el valor de la emisividad. El error de temperatura medida frente a variaciones de emisividad de un 20 % es tan solo de un 4 % para una temperatura de 1000 °C [MOLPECERES 2002].
- La emisividad direccional de un emisor difuso,<sup>12</sup> es una constante independiente de la dirección. Aunque esta aproximación es a menudo razonable en superficies de baja rugosidad, todas las superficies presentan alguna desviación respecto este comportamiento ideal. En el caso de aceros, la dependencia angular de la emisividad es aproximadamente constante para ángulos  $\theta < 40^\circ$ , por lo que en la práctica, el pirómetro se colocará formando un ángulo con la vertical de unos  $30^\circ$ .<sup>13</sup> Así se asegura (según se vió en la página 33) que se mantiene dentro de la zona donde la emisividad que afecta a la medida es, aproximadamente, igual a la emisividad normal que es la que se encuentra en tablas y estimada en los diferentes ensayos previos que se han descrito.

Considerando lo ya comentado que la medida de los sistemas pirométricos no es absoluta sino relativa, lo que si es importante es mantener la misma inclinación del eje del pirómetro para todas las pruebas y procesos sucesivos de temple, para que la variación de emisividad por el ángulo de incidencia no tenga influencia en el proceso. Puede que sea inferior al normal pero siempre será la misma, para determinados material y acabado superficial.

#### 4.5.2 Determinación de la anchura del haz

Uno de los parámetros que mas influyen en la comparación de los resultados que se pueden obtener entre la simulación y el experimento real es el valor de la anchura de haz (parámetro  $\omega$  del modo) ya que de ello depende la densidad de energía que incide sobre la pieza y por tanto los efectos que sobre ella se generan.

Se han utilizado diferentes procedimientos. Todos ellos se basan partiendo de que la distribución de potencia en un haz láser con un modo transversal TEM01\* viene

<sup>12</sup> Asimilando el cuerpo real al ideal, en el que se supone que la emisividad no depende de la dirección.

<sup>13</sup> El tamaño de la carcasa del pirómetro imposibilita reducir más este ángulo.



dada por la ecuación

$$z = Pot \cdot \frac{4(x^2 + y^2)}{\pi w^4} \cdot \exp \left[ \frac{-2(x^2 + y^2)}{w^2} \right] \quad (4.8)$$

que representada para determinados valores de potencia y anchura presenta el aspecto como el de la figura 4.30.

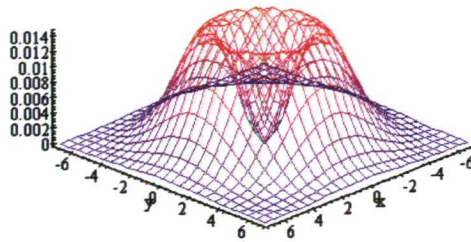


Figura 4.30: Representación matemática del modo TEM 01\*.

Si cortamos esta figura a una determinada altura, se obtienen dos círculos concéntricos que determinan puntos donde la potencia alcanzó un determinado valor y, por tanto, una determinada densidad de energía. Si hacemos incidir un haz láser con este modo sobre un material durante el tiempo suficiente dejará una huella que es imagen de la densidad de potencia alcanzada en cada punto. Para encontrar la relación entre el parámetro anchura del haz y esta huella basta igualar la expresión 4.8 para dos diámetros diferentes (que se corresponden con el interior y el exterior de la huella) para obtener la siguiente expresión:

$$w = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{d_e^2 - d_i^2}{\ln d_e - \ln d_i}} \quad (4.9)$$

Así, es suficiente realizar un impacto de duración suficiente con el haz láser sobre un determinado material (papel fotográfico, metacrilato, papel normal, cartulina, etc.) para obtener la huella que nos permitirá calcular la anchura del haz que luego usaremos en las simulaciones numéricas. El tipo de huellas obtenido se muestra en la figura 4.31. Evidentemente la intensidad de la huella depende de las características del material y la duración del impulso necesario varía con el diámetro del haz y del nivel de potencia total. La ventaja de este sistema es que para diferentes alturas, que se corresponden con diferentes niveles de energía total, los diámetros exterior e interior varían de tal modo que la solución para la anchura, obtenida a partir de la ecuación 4.9, es la misma.

Otro aspecto a tener en cuenta es que si el material sobre el que realizamos el impacto es muy sensible, para diámetros muy pequeños de haz y distancias al punto

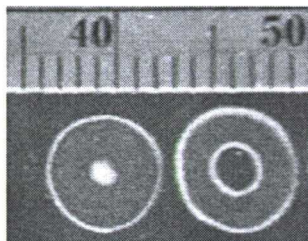


Figura 4.31: *Huella sobre metacrilato.*

focal pequeños, el tiempo necesario para que la huella no perfora el material puede ser inferior al disponible en el control del láser. Así para cada diámetro de haz y nivel de potencia se requiere realizar pruebas con diferentes materiales hasta obtener una huella clara que nos permita medir con la suficiente precisión. Una vez realizadas las medidas para diferentes distancias se puede elaborar una tabla o gráfica donde en función de la distancia al punto focal se dispone del valor de anchura de haz correspondiente utilizable en todos los procesos que se realicen con el mismo equipo y lente.

También hay que tener en consideración que dependiendo del tipo de resonador el diámetro del haz puede ser diferente para cada nivel de potencia (Ver página 157). En nuestro caso se trata de un láser de flujo axial rápido, el diámetro de salida va creciendo con la potencia, pero a partir del 45 % de la potencia nominal el diámetro no varía apreciablemente. Para anchuras superiores al milímetro las medidas se pueden realizar directamente con un calibre. Para medidas inferiores, se puede obtener con microscopio una imagen calibrada y efectuar las medidas sobre la imagen mediante un programa de tratamiento adecuado.

Para contrastar la bondad del procedimiento anterior se realizaron este tipo de medidas utilizando el analizador de haz descrito en el Apéndice A. Una de las opciones que permite este equipo es obtener un perfil de la distribución de potencia a diferentes alturas con un gráfico como el de la figura 4.32. En ella el programa del analizador proporciona en línea amarilla el perfil de potencia en un plano vertical y otro horizontal para una línea de corte determinada seleccionable arrastrando un cursor naranja. Como se conoce la dimensión total del área de medida se pueden medir directamente los diámetros interiores y exteriores para diferentes alturas de corte. Las líneas blancas son los perfiles equivalentes de un modo TEM<sub>00</sub> que aportase la misma energía total. La resolución espacial del analizador, teniendo en cuenta el número total de elementos sensibles disponibles (matriz de 212 elementos) y el tamaño máximo de la ventana de medida (5 mm × 5 mm) sería de 24  $\mu\text{m}$ , pero al incluir las limitaciones

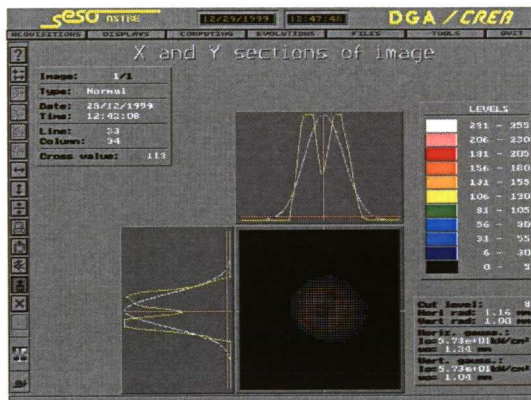


Figura 4.32: Ventana del analizador mostrando sección y perfiles del haz.

de los dispositivos mecánicos móviles asociados al equipo, resulta ser de  $80 \mu\text{m}$ . Así para una anchura de haz de 3 mm la incertidumbre en el valor del área y por tanto en la densidad de energía aplicada a la pieza es del 5.4 %. Sin embargo para anchuras mayores, de 6 mm por ejemplo, la incertidumbre en el valor del área resulta ser del 2.7 %.

Posteriormente se han contrastado los valores de anchura del haz obtenidos por este método y por el de las huellas de quemaduras sobre materiales, comprobando que son muy similares (ver figura 4.33). Si bien el método del analizador está limitado por el tamaño máximo de haz que es capaz de analizarse se ha detectado que el método de las huellas es sensible a la apreciación de la persona que lo realiza y el del analizador es de resultados mas independientes del operador, una vez familiarizado con el equipo y la aplicación informática disponible.

#### 4.5.3 Comprobaciones previas al control en tiempo real

##### Condicionantes de las variaciones de potencia

Ante variaciones de potencia en principio el punto más caliente no debía variar de posición relativa respecto del centro del haz, pero dependiendo del tipo de resonador láser si puede tener influencia. Debido al propio diseño de cada resonador, para un mayor nivel de potencia exigido puede variar el diámetro del haz y por tanto variar la densidad de potencia tanto por la variación de potencia disponible como por el área de influencia.

Con el resonador utilizado en los trabajos de esta tesis se ha medido, con la ayuda

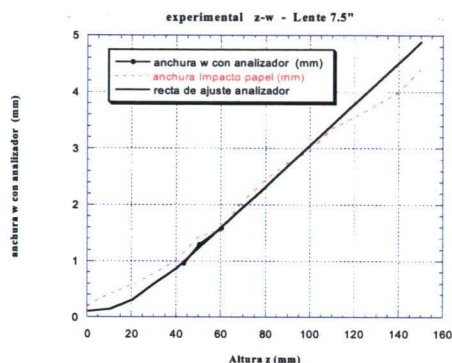


Figura 4.33: Anchura haz. Comparativa impacto papel-medidas con analizador.

de un analizador de haz (de características descritas en el Apéndice A), el diámetro del haz para una determinada distancia del punto focal, en función del nivel de potencia de salida encontrando (ver figura 4.34) que hay gran diferencia si los niveles de potencia están suficientemente alejados.

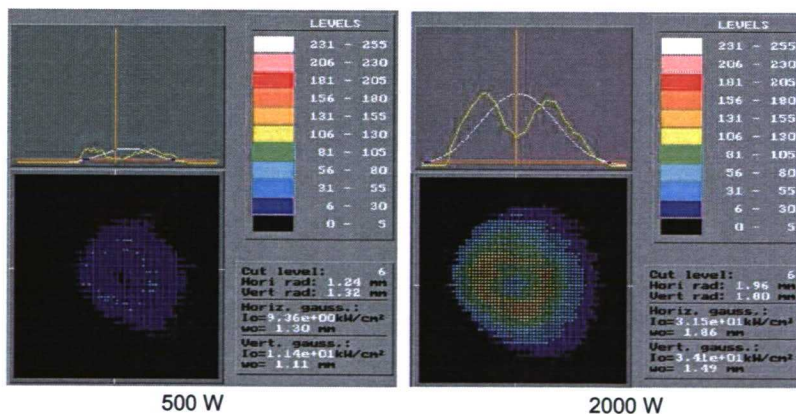


Figura 4.34: Perfil del haz para potencia 500 W y 2000 W para una distancia al punto focal de 43 mm.

El mismo analizador proporciona, por cálculo, las características del haz gaussiano equivalente a la distribución real a efectos de densidad de energía y ancho equivalente del haz. En estas mismas figuras se puede apreciar el ancho del haz gaussiano equiva-



lente a cada distribución, encontrando que para la potencia de 500 W el ancho es de 1.3 mm mientras que para la potencia de 2000 W alcanza un valor de 1.86 mm. Esto afecta a la posición del punto más caliente debido a que las crestas de la distribución están mas separadas y si apuntamos un sensor a un punto determinado, al variar la potencia estamos midiendo en un punto diferente del que nos interesa.

Para potencias inferiores al 15 % de la potencia nominal el diámetro disminuye drásticamente, mientras que para potencias superiores al 45 % de potencia nominal apenas varía. Como normalmente el parámetro de potencia en un tratamiento térmico superficial se tiene que mover en un entorno no muy amplio de determinado valor de potencia, esto no provoca demasiada deriva en la situación real del punto mas caliente y por lo tanto, no tendrá demasiada importancia en la práctica. Como se verá en la hoja 224 y siguientes, las variaciones de potencia durante un tratamiento realizado con el control automático la variación de potencia no excede (salvo en el instante inicial del proceso) de un 10 % alrededor de 1800 W en el caso de geometrías planas y es inferior a un 20 % alrededor de 1700 W en caso de geometrías cilíndricas.

En esos rangos de potencia el diámetro del haz suministrado por el sistema láser es prácticamente constante, no apreciándose con el analizador variación significativa del ancho del haz gaussiano equivalente.

#### Linealidad entre la entrada señal analógica y la potencia láser

Para comprobar el funcionamiento de la entrada externa de potencia al armario de control de láser se introdujo una señal en la tarjeta X44, terminales 11 y 12 mediante

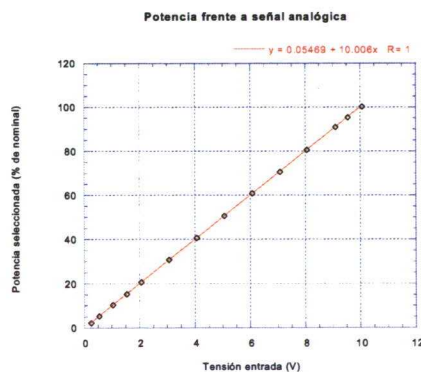


Figura 4.35: Potencia láser en función de la entrada analógica.

una fuente de tensión continua variándola entre 0 V y 10 V voltios en la tarjeta.

representando los valores obtenidos en la figura 4.35 se observa que la relación es perfectamente lineal (la recta de regresión tiene el parámetro  $R=1$ ).

#### Ruido en señal de salida del PC de control: entrada al PLC

A pesar de ser una señal analógica que sale de un convertidor digital analógico con salida en corriente continua es necesario comprobar la posible influencia del tipo de cable utilizado dado el ambiente industrial existente en el laboratorio.<sup>14</sup> Se comprobó

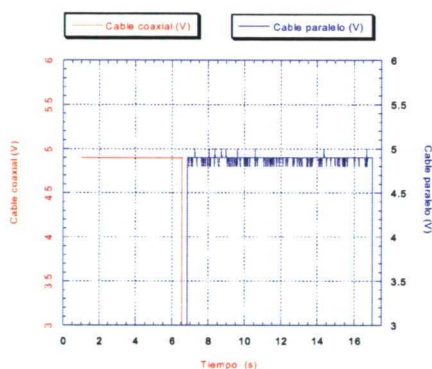


Figura 4.36: *Ruido en la señal de entrada al PLC.*

para una señal de salida fija de 4,9 V, seleccionada en la tarjeta de control, midiendo lo que llegaba a la entrada analógica en el armario eléctrico del CNC. Se hicieron medidas para un cable paralelo con apantallamiento sencillo del 50 % de recubrimiento y con un cable coaxial RG-58 B/U de 50  $\Omega$ . Las medidas se resumen en la figura 4.36 donde se aprecia la necesidad de usar el cable coaxial porque evita un ruido previo de 0,2 V, que equivale a oscilaciones en la potencia del láser de unos 50 W, limitándolo a algunos milivoltios, inapreciables en la figura mostrada. En valor absoluto no parece importante, pero si lo es el hecho de que la señal de entrada está oscilando pudiendo originar una oscilación que puede afectar a la respuesta del sistema.

<sup>14</sup>Presencia de convertidores de frecuencia para el control de velocidad del blower del resonador y de los motores para el movimiento de la mesa.

## Capítulo 5

# Diseño del sistema de control

Ya se ha visto en anteriores capítulos que en la mayor parte de los procesos de tratamiento con láser la calidad final obtenida puede variar en función de fluctuaciones de los parámetros del sistema, como son la potencia del láser, la velocidad de procesamiento, así como variaciones de parámetros característicos del proceso de interacción (variaciones de absorción, geometría de la pieza, etc.). Pequeñas variaciones de estos parámetros pueden afectar a la calidad final del proceso [BERGMANN 1993] (un cambio de un 10 % en la potencia absorbida puede causar variaciones de hasta 50 % en la profundidad templada). También es significativo la influencia de la velocidad de enfriamiento de la pieza, dependiente de las propiedades del material y de la geometría de la pieza (la proximidad de aristas vivas a la zona de tratamiento hace que se alcance mayor temperatura por presentar menos volumen de material, disminuyendo el flujo de calor evacuado). Por tanto, estos efectos deben ser objeto de un estudio previo a la realización del tratamiento mediante simulaciones numéricas como las desarrolladas en [SAAVEDRA 2004].

En la práctica para lograr un tratamiento de calidad adecuada y reproducible en el tiempo, es necesario monitorizar y realizar un control en tiempo real, adecuado al proceso con vistas a su normal desarrollo en las condiciones de calidad y repetibilidad deseadas en la industria.

### 5.1 Elección del sistema de control

De entre todos los diferentes sistemas de control utilizados en la actualidad, los reguladores PID (Proporcional, Integral y Derivativo del error entre la consigna de referencia proporcionada al sistema y el valor realmente alcanzado por el mismo) están suficientemente contrastados en el ámbito industrial como consecuencia del alto grado de uso y experiencia que en ellos se tiene sobre su comportamiento, así como su

facilidad de sintonización.

Con el fin de lograr una mejor adecuación del regulador a las características del sistema se diseña un controlador PID clásico, sintonizado con los criterios propuestos por Ziegler y Nichols [ZIEGLER 1942], al que se le han incorporado una serie de modificaciones y correcciones, entre las que destacan:

- Introducción de un bloque de integración trapezoidal, para evitar cambios muy drásticos de este término cuando el error es muy grande.

- Limitación en el término derivativo, con la finalidad de evitar saltos excesivamente bruscos en la actuación, minimizando así los efectos del posible ruido externo que puede venir superpuesto a la señal de entrada.

- Limitación de la señal de salida hacia el control del láser, para recoger la limitación física de la potencia máxima de salida del resonador láser.

Estas características se detallan en los apartados siguientes.

## 5.2 El algoritmo PID clásico

Un regulador PID standard compara el valor deseado de referencia  $V_{ref}$  (valor de temperatura máxima deseada en la superficie del material) con el valor de la variable de proceso  $V_{proc}$  (valor de temperatura real medida por el pirómetro) para obtener la señal de error ( $e$ ),

$$e = V_{ref} - V_{proc} \quad (5.1)$$

El regulador PID calcula la actuación  $u(t)$  (la consigna externa de potencia láser), donde  $K_p$  es la ganancia del regulador:

$$u(t) = K_p \left( e + \frac{1}{T_i} \int_0^t e \cdot dt + T_d \frac{de}{dt} \right) \quad (5.2)$$

$T_i$  es el tiempo integral y  $T_d$  el tiempo derivativo. La siguiente expresión representa la acción proporcional

$$u_p(t) = K_p \cdot e \quad (5.3)$$

La acción integral viene dada por:

$$u_I(t) = \frac{K_p}{T_i} \int_0^t e \cdot dt \quad (5.4)$$

mientras que la acción derivativa sería:

$$u_D(t) = K_p T_d \frac{de}{dt} \quad (5.5)$$



### 5.3 Implementando un algoritmo PID mejorado

#### Calculo del error en cada periodo de muestreo

Así como  $V_{ref}$  puede ser constante durante un proceso determinado, en cada uno de los periodos de adquisición  $k$  hay un valor de la variable de proceso diferente que llamaremos  $V_{proc}(k)$  y por tanto la ecuación 5.1 se transforma en

$$e(k) = V_{ref} - V_{proc}(k) \quad (5.6)$$

#### Acción proporcional

Así la acción proporcional es  $K_p$  veces el error  $e(k)$  existente en cada en cada periodo

$$u_p(k) = K_p \cdot e(k) \quad (5.7)$$

#### Integración trapezoidal

La integración realizada a partir de la expresión 5.4 resultaría como se indica a continuación

$$u_I(k) = \frac{K_p}{T_i} \sum_{i=1}^k e(i) \cdot \Delta t \quad (5.8)$$

Para evitar cambios demasiado bruscos en la actuación cuando el error  $e(k)$  es grande (por cambio repentino en el valor de la variable de proceso  $V_{proc}$  o cuando el error es muy grande, como al iniciar un tratamiento donde la diferencia entre la temperatura real y la deseada es máxima) se utiliza la integración trapezoidal que se indica en la expresión 5.9. Con este método, cuanto mas grande es el error, menor es la acción integral al hacer media con el valor del periodo anterior, sin embargo cuando el error es pequeño su influencia es mayor y mas parecida a la de la expresión 5.8, consiguiendo un error de seguimiento menor.

$$u_I(k) = \frac{K_p}{T_i} \sum_{i=1}^k \left[ \frac{e(i) + e(i-1)}{2} \right] \Delta t \quad (5.9)$$

#### Acción derivativa parcial

Para evitar que posibles cambios repentinos en el valor de referencia (como ocurre al comienzo del proceso) provoquen golpes bruscos en la acción diferencial, solo se aplica la acción derivativa en la variable de proceso. Así, la ecuación para el control diferencial utilizado queda

$$u_D(k) = -K_p \frac{T_d}{\Delta t} [V_{proc}(k) - V_{proc}(k-1)] \quad (5.10)$$

donde el signo menos indica que cuando la pendiente de la variable de proceso frente al tiempo tiende a disminuir ( $V_{proc}(k) < V_{proc}(k-1)$ ) la acción derivativa  $u_D(k)$  tiende a aumentar la salida del regulador intentando corregir la tendencia decreciente.

### Salida del regulador

Con las variaciones expuestas, la salida del regulador utilizado viene dada por

$$u(k) = u_p(k) + u_I(k) + u_D(k) \quad (5.11)$$

### Limitación de la salida

La salida del regulador se limita al rango de valores admitidos por el armario de control del sistema láser. Así,

$$\begin{aligned} \text{si } u(k) &\geq u_{\max} \text{ entonces, } u(k) = u_{\max} \\ \text{si } u(k) &\leq u_{\min} \text{ entonces, } u(k) = u_{\min} \end{aligned}$$

En nuestro caso el valor máximo está limitado a 10 V, que corresponde con el 100 % de potencia, mientras que el valor mínimo es de 0 V. Aparte de imponer esta limitación (ya integrada en el regulador PID proporcionado por LabVIEW<sup>®</sup>) al pasar la señal por el programa PLC para integrarlo con los movimientos de la pieza bajo tratamiento y con la supervisión de seguridades de los equipos, se hizo necesario otra limitación por requerimientos del propio sistema del PLC: Ver líneas de programa correspondientes a Control Externo de Potencia en página 142.

## 5.4 Diagrama de bloques del PID con LabVIEW<sup>®</sup>

Con los requisitos que se han comentado en apartados anteriores se ha configurado el diagrama de bloques que se muestra en la figura 5.1.

En el se pueden distinguir los diferentes elementos que lo componen: Selector de temperatura deseada, bloque para la introducción de parámetros del regulador, bloque del regulador PID, almacen de datos para los registradores en tiempo real de las señales entrada, de referencia y salida, aparte de otros botones para activar, parar, ver o no los registros, etc.

Los datos de señal de entrada, de referencia y consigna de potencia de salida quedan registrados en un archivo de texto que luego se puede representar para ver en detalle lo que ocurrió durante el tratamiento. Este registro puede utilizarse posteriormente como datos para asegurar la trazabilidad en el control de calidad de las piezas tratadas.

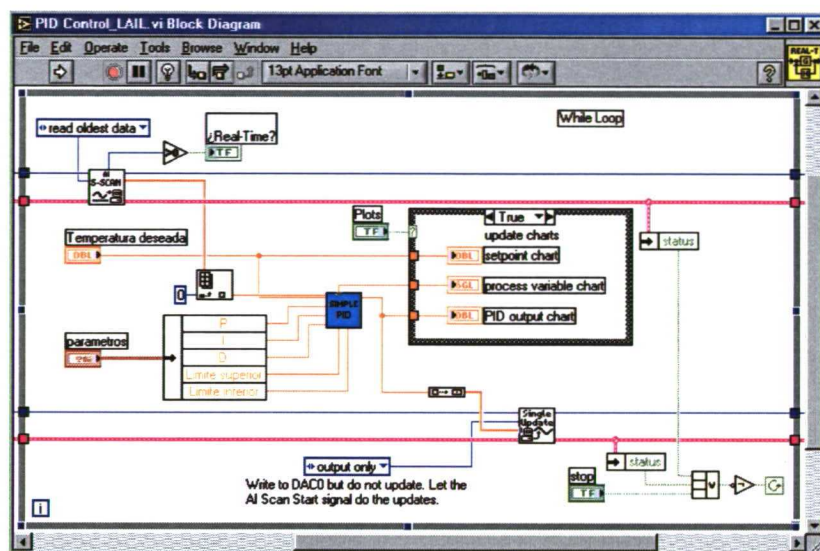


Figura 5.1: Diagrama de bloques del programa PID con LabVIEW®.

### 5.5 Ventana de usuario del regulador real

En la figura 5.2 se puede apreciar la ventana de usuario que es la que se muestra mientras el regulador está controlando el sistema. En ella se dispone de una representación en tiempo real, tanto del valor de referencia (valor de temperatura deseado) como la de los valores de temperatura real medida por el pirómetro y la señal de salida del regulador PID (consigna de potencia láser). En el ejemplo mostrado, cuando la lectura del pirómetro (centro), disminuye por debajo de la referencia (arriba), la salida del regulador (abajo) cambia de nivel bajo a nivel alto, en el sentido de que al pedir mayor potencia láser se elevará la temperatura.

En otros botones se puede seleccionar los valores de los parámetros del regulador obtenidos de la sintonización. También se puede cambiar fácilmente el canal (entre los 8 disponibles) por donde introducimos la señal del pirómetro y por donde sale la consigna de potencia (uno solo si se usa esta salida en modo diferencial). También se puede elegir el rango de tensión para la consigna de potencia para adecuarla a diferentes sistemas láser.

Por motivos de seguridad se dispone un botón de parada de alta visibilidad, redundante con el ya disponible en el entorno LabVIEW®, mucho más pequeño y situado en la barra de menús.

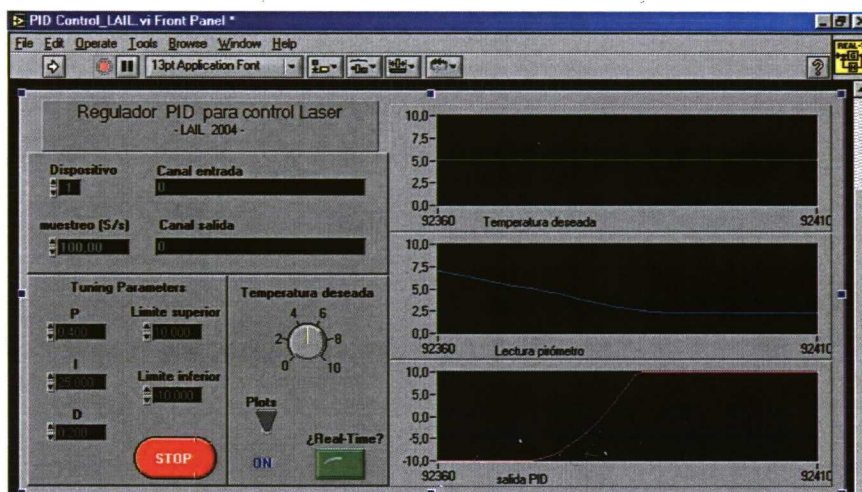


Figura 5.2: Ventana usuario PID con LabVIEW®.

También disponemos de un indicador luminoso con la leyenda *Real Time?*, que cambia a color rojo, si el tiempo empleado por el algoritmo de control excede al tiempo disponible en función del tiempo entre dos capturas consecutivas de la tarjeta de adquisición. Esto nos da idea de si el sistema de control se puede considerar en tiempo real. Si se aumenta progresivamente el número de muestras por segundo se llega a un valor a partir del cual el tiempo entre tomas sucesivas es menor que el empleado por el ordenador en calcular el nuevo valor de señal de consigna y ya no estaría respondiendo a las variaciones reales del sistema.

En las pruebas realizadas para encontrar el límite se consigue la actuación en tiempo real incluso para valores de muestreo de 12 000 muestras por segundo, lo que da un tiempo de cálculo inferior a  $83 \mu\text{s}$  con el ordenador empleado (con procesador Pentium III® a 1.4 GHz). En nuestra aplicación, por estar limitado el tiempo de muestreo por la velocidad de adquisición del pirómetro (10 ms) el tiempo de muestreo del PID siguiendo la teoría de control (el tiempo de muestreo deberá ser entre 1 y 10 veces mas rápido, dependiendo de si el sistema es muy lento o muy rápido, que la constante de tiempo mas corta de todo el sistema real) se fija en 20 ms que corresponde a 50 muestras por segundo.



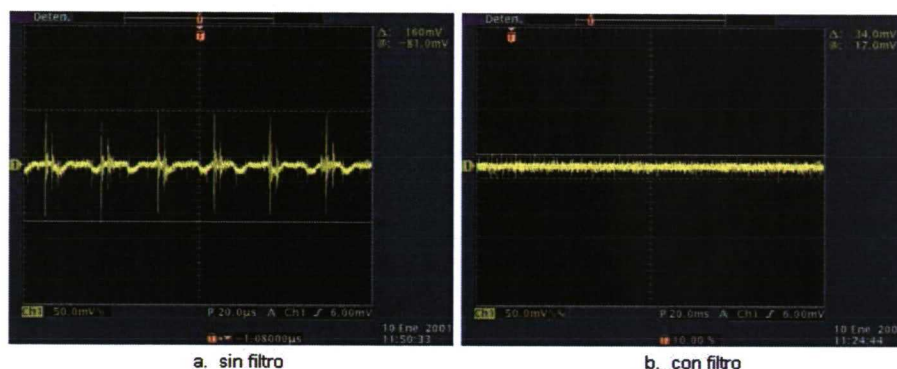


Figura 5.3: *Ruido en la señal del pirómetro por los convertidores de frecuencia, antes (izq) y después (dcha.) del filtro paso-bajo.*

## 5.6 Filtrado de la señal

Al iniciar los trabajos de caracterización del pirómetro y la señal que proporciona se encuentra que utilizando cable coaxial, bajo tubo metálico se limitaba el ruido de la señal en el entorno de los 22 mV. Al empezar las pruebas con el sistema de control y el equipo laser funcionando se detectó que aparecían nuevas fuentes de ruido que resultaron ser el convertidor de frecuencia que regula la velocidad del blower del resonador y los reguladores de velocidad de la mesas de coordenadas que mueven la pieza respecto al haz. Esta señal aparecía como una señal de frecuencia mayor (2,5 MHz) superpuesta a la señal y con variaciones periódicas (periodo 30  $\mu$ s) como se aprecia en la figura 5.3.a y que alcanza 160 mV pico a pico.

Como lo que se pretendía era limitar o evitar picos muy rápidos y teniendo en cuenta que –debido a la inercia térmica de las piezas– en un proceso de tratamiento térmico no se puede esperar que en los 20 ms que pasan entre dos capturas de datos se pueda dar una variación de temperatura de 100 °C o mas, se pensó que la solución mas adecuada era en incorporar un filtro paso-bajo en la señal de entrada.

En el entorno de programación LabVIEW® se puede incorporar fácilmente un filtro de este tipo. Con el bloque PID Control Input Filter se puede filtrar el ruido de alta frecuencia en la señal de entrada al regulador. Para optimizar el filtrado del ruido propio de la señal y del inducido por la propia frecuencia de muestreo de la tarjeta de adquisición, la frecuencia de corte está ajustada a un décimo de la frecuencia de muestreo elegida. Como elegimos una frecuencia de muestreo de 50 Hz, la frecuencia

de corte del filtro se sitúa en 5 Hz. Después de incorporado este filtro, el ruido quedó limitado a 34 mV pico a pico, como se aprecia en la figura 5.3.b.

## 5.7 Ajuste del regulador por el método de Ziegler-Nichols

El método de la transformada de Laplace es un método de cálculo que se puede usar para resolver ecuaciones diferenciales lineales. Con esto, muchas funciones sinusoidales, sinusoidales amortiguadas y exponenciales se pueden convertir en funciones algebraicas de una variable compleja  $s$ , de modo que operaciones como la diferenciación o la integración se reemplazan por operaciones algebraicas en el plano complejo.

Por medio de la transformada de Laplace, la ecuación diferencial 5.2 se puede convertir en una ecuación algebraica de una variable

$$G_c(s) = K_p \left( 1 + \frac{1}{T_i \cdot s} + T_d \cdot s \right) \quad (5.12)$$

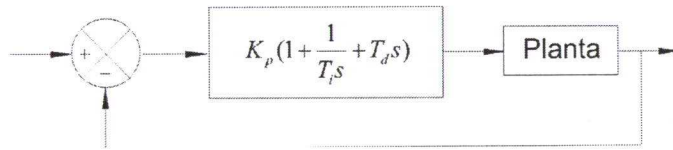


Figura 5.4: Control PID de una planta.

Si esa ecuación algebraica se resuelve en  $s$  para la variable dependiente, se puede hallar la solución de la ecuación diferencial original (la transformada inversa de Laplace de la variable dependiente) utilizando una tabla de transformadas de Laplace.

Otra ventaja del método de la transformada de Laplace, es que permite utilizar métodos gráficos para predecir el funcionamiento del sistema sin tener que resolver la ecuación diferencial para cada caso.

En la figura 5.4 se muestra un control PID de una planta en lazo cerrado una vez transformada por Laplace. Si se puede deducir un modelo matemático de la planta, es posible aplicar varias técnicas [DORF 1989], [OGATA 1993], para determinar los parámetros del controlador que cumplan con determinadas especificaciones transitorias y de estado estacionario del sistema en lazo cerrado. Existen diversos métodos para ajustar un regulador, esto es, determinar los valores óptimos para los tres parámetros de las acciones proporcional, integral y derivativa: Análisis de la estabilidad crítica en lazo cerrado y respuesta del sistema en lazo abierto a un escalón.

### 5.7.1 Análisis de la estabilidad crítica en lazo cerrado

A pesar de que este sistema de sintonizado es muy preciso, exige poner el sistema en un estado de oscilación mantenida (que no siempre es admisible por propia integridad del sistema) y observar la variable de proceso representada en una gráfica. Los pasos a seguir son los siguientes:

- Seleccionar valores cero para ambos tiempos integral y derivativo ( $T_i$  y  $T_d$ ).
- Con el regulador en “control automático” se va aumentando muy despacio la ganancia proporcional  $K_c$  en pequeños incrementos. En cada uno de los valores provocar una pequeña variación en el valor de referencia.
- Cuando esa pequeña variación provoque una oscilación mantenida de la salida del regulador, registrar el valor de banda proporcional  $PB_u$  como el resultado de  $PB_u = \frac{100}{K_c}$ .
- Registrar el periodo de oscilación  $T_u$  en segundos.
- Multiplicar los valores obtenidos por los indicados en la tabla 5.1 para obtener los valores de los parámetros de cada uno de los lazos del PID.

Tabla 5.1: Valores de los parámetros del PID con ajuste lazo cerrado.

Regulador	$PB$	$T_i$ (segundos)	$T_d$ (segundos)
PID	$1.67PB_u$	$0.50T_u$	$0.125T_u$

La ganancia proporcional del PID final se obtiene a partir del valor de la banda proporcional, como  $K_p = \frac{100}{PB} = \frac{K_c}{1.67}$ .

Si una vez seleccionados los valores calculados según se acaba de señalar se observa mucho sobrepaso en la respuesta del sistema, se puede reducir este sobrepaso incrementando la ganancia  $K_c$ . Como ya se ha comentado con anterioridad, no se aplica este método por necesitar someter al equipo a un funcionamiento extremo que no es conveniente por motivos de seguridad del propio sistema.

### 5.7.2 Respuesta a un escalón del sistema en lazo abierto

#### Introducción

Este método presupone que el sistema se comporta como un sistema de primer orden y un retardo puro. Este método implica mayor análisis que el anterior pero no necesita mantener la oscilación del sistema. A pesar de su mayor requisito de tiempo puede

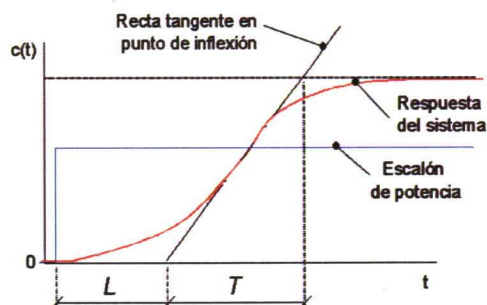


Figura 5.5: *Parámetros a determinar con la curva de respuesta del sistema a un escalón.*

resultar muy rápido y fiable para muchos sistemas. Es el que se ha utilizado para esta tesis.

Simplemente se trata de registrar la evolución de los valores de la respuesta del sistema (temperatura registrada por el pirómetro) cuando se introduce un escalón determinado en la consigna de potencia láser.

Se deben seguir los siguientes pasos para realizar la sintonización del sistema:

- Poner el regulador en modo manual y seleccionar un valor de consigna pequeño dentro del rango operacional del láser pero que origine una temperatura dentro del rango de medida del pirómetro ( $450\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) para determinado par de parámetros (velocidad, anchura haz) y permitir el sistema alcance el estado estacionario, registrando mientras tanto la variación de la consigna (escalón de potencia) como el valor de temperatura.
- Seleccionar otro valor mayor para la consigna de potencia y esperar a que el sistema se estabilice.
- A partir de la gráfica de la figura obtenida del experimento, similar a la de la figura 5.5, se determinan los valores de  $L$  (tiempo de retardo) y de  $T$  (constante de tiempo) y se multiplican los valores medidos por los factores indicados en la tabla 5.2 e introducir los valores obtenidos en el regulador. El tiempo integral  $T_i$  y el tiempo derivativo  $T_d$ . Si se desea menos sobrepaso, se debe reducir la ganancia del lazo proporcional  $K_p$ .
- Si la planta no tiene ganancia unidad, hay que calcular esta ganancia de la planta



Tabla 5.2: Valores de los parámetros del PID con ajuste lazo abierto.

Regulador	$K_p$	$T_i$	$T_d$
PID	$1.2 \frac{T}{L}$	$2.00L$	$0.5L$

como

$$K_{gp} = \frac{\text{variación en temperatura } (^{\circ}\text{C})}{\text{variación en potencia (W)}}$$

El resto de los parámetros del regulador (en términos de ganancia de cada uno de los lazos) se determinan según la tabla 5.3

Tabla 5.3: Valores de los parámetros del PID con ganancia distinta de uno.

Regulador	$K_p \left( \frac{\text{W}}{^{\circ}\text{C}} \right)$	$K_i \left( \frac{\text{W}}{^{\circ}\text{C s}} \right)$	$K_d \left( \frac{\text{W}}{^{\circ}\text{C s}} \right)$
PID	$\frac{1.2}{K_{gp}} \frac{T}{L}$	$\frac{K_p}{2L}$	$0.5LK_p$

### 5.7.3 Medidas experimentales y sintonización del sistema

Se desechó utilizar el método de la de la estabilidad crítica en lazo cerrado porque exige poner el sistema en estado de oscilación mantenida y aunque el sistema de control del láser no presenta problemas a mantener ese estado, en la práctica lleva a que la probeta utilizada alcance temperaturas superiores a la de fusión y pueden tener lugar proyecciones periódicas de material fundido que pueden dañar la óptica de enfoque. Por tanto solo se utilizó el método de la respuesta a un escalón del sistema en lazo abierto.

Se registraron tanto la potencia como la evolución de la temperatura de una probeta de acero F114 (de los que se va a estudiar su endurecimiento superficial posteriormente) ante un escalón de potencia de 1400 W, para una anchura de haz de 4 mm y una velocidad de 10 mm/s.

Se hace notar que el registro mostrado en la figura 5.6 no se parece mucho a la curva en forma de “S” tal y como aparece en la figura 5.5 dado que no se aprecia el punto de inflexión. Sin embargo, sí se puede ajustar una recta a la pendiente de subida resultando unos valores de corte con el eje de abscisas en  $t = 0,7$  s y con el valor final de la temperatura, que se establece en  $800^{\circ}\text{C}$ , para un valor del tiempo de 1 s. Como el escalón de potencia se empieza a aplicar en el tiempo  $t = 0,5$  s los valores de los parámetros de Ziegler-Nichols resultan ser de  $L = 0,20$  s y  $T = 0,3$  s.

Con estos valores y los datos de temperatura alcanzada y la potencia necesaria para conseguirla se determinan:

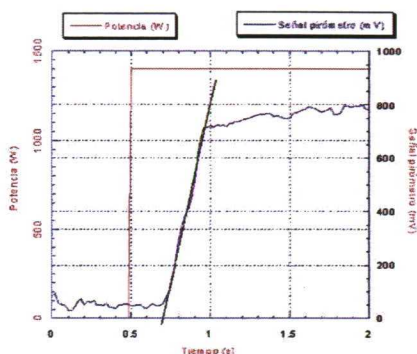


Figura 5.6: Respuesta real a un escalón de 1400 W y anchura de haz de 4 mm.

$$K_{gp} = \frac{800^{\circ}\text{C}}{1400 \text{ W}} = 0.57^{\circ}\text{C W}^{-1}$$

El resto de valores iniciales de los parámetros calculados son  $K_p = 3,15 \frac{\text{W}}{^{\circ}\text{C}}$ ;  $K_i = 7,89 \frac{\text{W}}{^{\circ}\text{C s}}$ ;  $K_d = 0.32 \frac{\text{W}}{^{\circ}\text{C s}}$ . Estos datos se introducen como valores iniciales para el PID que luego se mejorarán con la sintonización posterior. Además de estos valores, en el sistema de control habrá que introducir la relación entre el valor de potencia (W) y el valor de la consigna (V) de salida del regulador (2250 W se corresponden a 10 V).

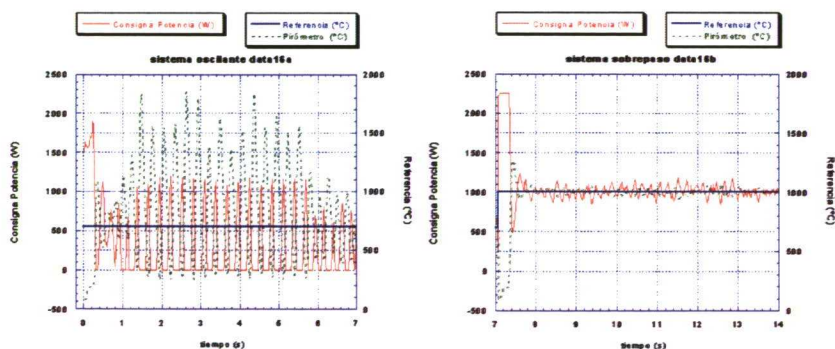


Figura 5.7: Registros para anchura de haz de 3 mm y valores de referencia de 700 °C (izq) y 1000 °C (dcha).

Posteriormente se disminuyó el diámetro del haz de 4 mm a 3 mm, que es el

valor de anchura utilizado en los experimentos posteriores. Al disminuir el diámetro se aumenta la densidad de energía a la vez que se disminuye el volumen total de material irradiado lo que aumenta la velocidad característica del sistema láser-pieza y la temperatura máxima alcanzada para una potencia dada. Cabe esperar, por tanto, que si se utilizan los parámetros del PID anteriormente obtenidos para un sistema mas lento, el regulador presente una respuesta más rápida, llegando incluso a oscilar. Esto se puede apreciar en la gráfica 5.7 izquierda.

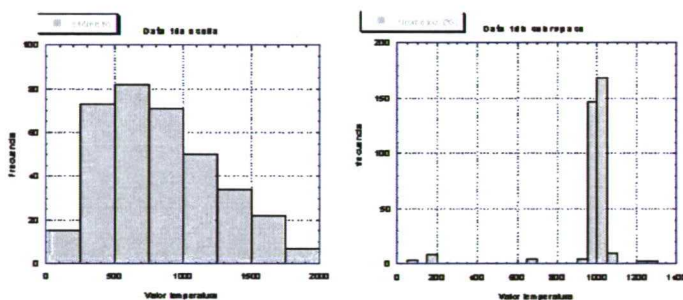


Figura 5.8: Gráfico de frecuencias para los registros de temperatura de un sistema oscilante (izq) y otro estable (dcha).

La gráfica de la izquierda se realizó para una señal de referencia de 700 °C con los parámetros del regulador iniciales y tal como se suponía el sistema se presenta como oscilante, oscilando la consigna de potencia entre 0 W y 1000 W, siendo incapaz de mantener una temperatura estable.

En la gráfica de la derecha, con los mismos parámetros pero con señal de referencia superior (1000 °C) el sistema presenta un sobrepaso del 40 % y después, aún teniendo una ligera oscilación, mantiene la temperatura en el entorno de  $\pm 100$  °C alrededor de los 1000 °C de referencia.

Partiendo de los registros de la figura 5.7 se calcularon los gráficos de frecuencias de la 5.8, donde se aprecia que los valores de temperatura obtenidos para el sistema inestable (izquierda) presentan una gran dispersión de valores mientras que en el sistema estable (derecha), los valores de temperatura están mucho mas centrados alrededor del valor de referencia elegido de 1000 °C. También se puede apreciar que los valores predominan en el entorno de 950 °C hasta 1050 °C. Esta ligera desviación hacia valores superiores al de referencia es consecuencia del sobrepaso inicial.

Es de destacar que lo que interesa es que el sistema sintonizado sea válido para el rango de temperaturas utilizadas para endurecimientos. En el caso antes contemplado de la referencia en un valor de 700 °C sirve para dejar claro que el sistema sintonizado,

para unos valores determinados de parámetros de proceso, no es igualmente válido para cualquier valor de la temperatura de referencia, por ejemplo. Para ello se va a fijar un margen de temperaturas posibles dentro de las utilizadas en un proceso normal de temple. Para un temple con un orden de magnitud para la velocidad de calentamiento en torno a los  $1000\text{ }^{\circ}\text{C s}^{-1}$ , el acero se debe de calentar del orden de  $120\text{ }^{\circ}\text{C}$  por encima de la temperatura crítica superior  $A_{c3}$  (que es de  $800\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) para garantizar el estado de austenización completa, según se indicó en apartado 2.3.1 para aceros hipoeutectoides y como límite superior está la de fusión,  $1450\text{ }^{\circ}\text{C}$  (caso del acero F114), aunque no se suelen superar los  $1200\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Esto es, el sistema de control debería de poder funcionar con las características de velocidad de respuesta, estabilidad y máximo error respecto al valor de referencia dentro de un rango de temperaturas entre  $920\text{ }^{\circ}\text{C}$  y  $1250\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

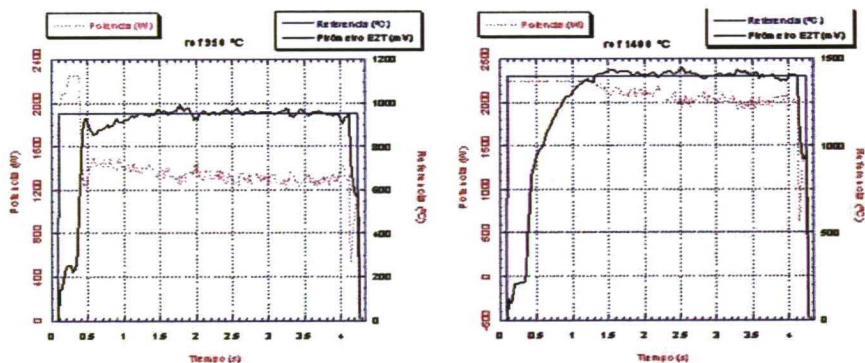


Figura 5.9: Respuesta del sistema para referencias de  $950\text{ }^{\circ}\text{C}$  (izquierda) y  $1400\text{ }^{\circ}\text{C}$  (derecha).

Modificando los parámetros utilizados en la figura 5.7 derecha, rebajando el valor de  $K_p$  hasta un valor de 2,33, dado que presentaba un sobrepaso inicial de casi un 40 % se realizan dos pasadas cerca de los posibles extremos de valores para la temperatura de referencia. Una cambiando la referencia a  $950\text{ }^{\circ}\text{C}$  y otra con  $1400\text{ }^{\circ}\text{C}$ , que sería muy superior a lo utilizado en la práctica, obteniendo los resultados de la figura 5.9 donde se aprecia que el sistema sigue teniendo una respuesta correcta.

En el caso de la temperatura de  $950\text{ }^{\circ}\text{C}$  (lado izquierdo de la figura) el sistema es más rápido que en la derecha y no llega a sobrepasar la temperatura de referencia al principio, mientras que en el caso de la referencia en  $1400\text{ }^{\circ}\text{C}$  (lado derecho de la figura) el sistema tarda más en alcanzar la temperatura deseada debido a que para



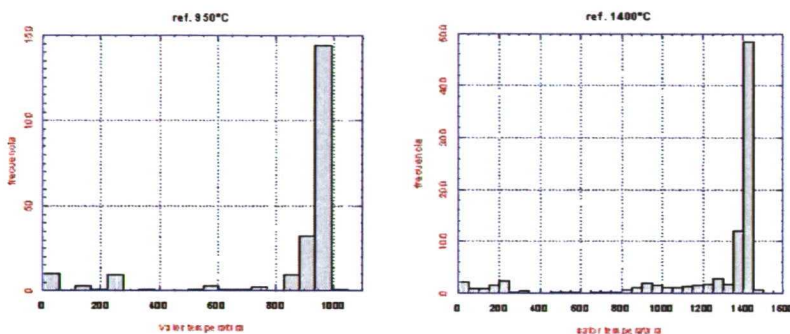


Figura 5.10: Gráfico de frecuencias para los registros de temperatura de un sistema estable para dos valores de referencia diferentes.

lograr alcanzar esta temperatura sería necesario disponer un mayor margen de potencia al comienzo, ya que solo para mantener la temperatura deseada ya es necesaria una potencia por encima de los 2200 W, con lo que apenas tiene margen para la actuación del regulador. En el supuesto de disponer de mas potencia en el sistema láser, por ejemplo 3000 W, facilitaría una elevación inicial de temperatura mas rápida. Aún con todo eso, la temperatura de referencia se alcanza al cabo de 1.3 s y después el sistema mantiene la temperatura estable.

En la figura 5.10 se muestran las gráficas de barras con las frecuencias de cada valor de temperatura donde se puede apreciar que prevalecen los valores próximos a los tomados como referencia, incluso a pesar de la baja velocidad de subida de temperatura en el caso de la referencia de 1400 °C.

En la figura 5.11 se muestra la respuesta del sistema (izquierda) y las barras de frecuencia (derecha) cuando se aumentó el valor del parámetro  $K_d$  hasta 0,37 lo que aumenta la velocidad de respuesta en las variaciones (alcanza los 1000 °C por primera vez en 0.15 s frente a los 0.4 s que le llevaba antes en la figura 5.7 derecha) y disminuyendo  $K_p$  hasta 2,33 (el sistema presenta un sobrepaso menor, en el entorno al 10 %). El regulador mantiene la temperatura en el entorno de  $\pm 50$  °C alrededor de los 1000 °C de referencia, lo que supone una variación del 5 % sobre el valor elegido.

También se puede observar que a medida que pasa el tiempo y al ser la probeta de dimensiones reducidas, va acumulando calor y la potencia necesaria para mantener la temperatura en un valor fijo va disminuyendo.

Variaciones en los parámetros de velocidad y anchura del haz, como provocan variación en la situación del punto mas caliente, hacen necesario realizar la secuencia

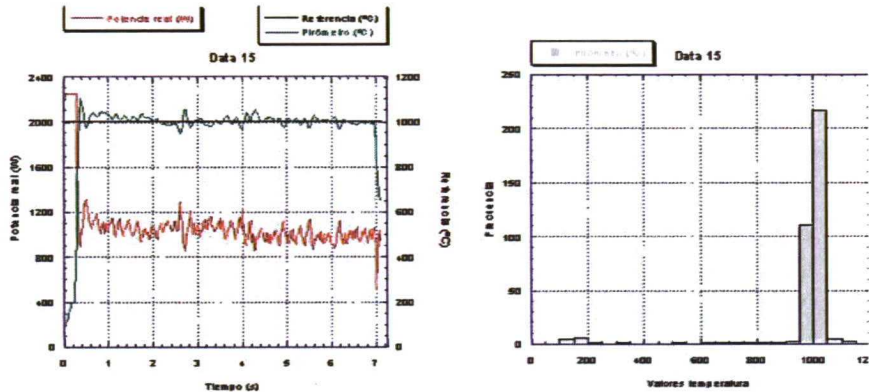


Figura 5.11: Sistema estable con  $K_p = 2,33$  ;  $K_i = 7$  ;  $K_d = 0.37$  y gráfica de frecuencias.

de pruebas descritas en 5.8, exceptuando el punto referente a la determinación del coeficiente de absorción del material.

## 5.8 Consideraciones finales

A la hora de implantar un sistema de control PID hay que tener en cuenta que si se sintoniza el regulador para un sistema determinado, los parámetros obtenidos sólo son válidos para ese sistema y otros que sean semejantes.

Hemos sintonizado el sistema para una pareja de parámetros velocidad y ancho de haz determinados. Sabemos que si aumentamos la velocidad relativa haz-pieza la probeta tarda mas tiempo en alcanzar la temperatura de régimen permanente. Por el contrario, si disminuimos la velocidad la temperatura subirá mas rápido porque el haz está incidiendo en puntos muy próximos de la pieza.

Algo similar ocurre con la anchura del haz. Si es muy grande, la densidad de energía es menor y la subida de temperatura es mas lenta. Por el contrario, un haz muy estrecho implica una alta densidad de energía y, por consiguiente, una subida de temperatura mas rápida.

Esto quiere decir que tanto el tiempo de retardo como la constante de tiempo del sistema van a variar cuando se varíen los parámetros velocidad y anchura de haz

del tratamiento y así un regulador sintonizado, para cierto valor de esta pareja de parámetros, puede resultar inadecuado (bien por lentitud o por volverse inestable) para otros valores.

También se ha visto en la figura 5.7 que, cambiando el valor de la referencia (temperatura deseada) un sistema inestable puede resultar casi estable y al revés un sistema estable para un valor de referencia puede resultar inestable para otro valor más pequeño.

Por eso, siempre que se cambien los valores de los parámetros de temperatura de referencia, velocidad y anchura del haz se debe realizar una prueba de respuesta al escalón para identificar el sistema adecuadamente y después sintonizar el regulador PID para un determinado proceso.

Otra cuestión a tener en cuenta es la posible diferencia de absorción de la radiación láser de diferentes materiales, que van a influir en la señal que proporcione el pirómetro. Por esta razón se propone como método a seguir para cada nuevo material y/o proceso de tratamiento:

- Para determinar el coeficiente de absorción del material se realizará una prueba sobre una probeta del mismo material, usando la temperatura del cambio de fase, como la que se detalla en el apartado 4.5.1. Para estos cálculos se necesitan las propiedades termofísicas del material a tratar.
- Conocido el factor con el que hay que corregir la lectura del pirómetro y con el auxilio de los modelos numéricos, se calcula la evolución de la temperatura en el material, situación de las isoterma, etc. para elegir los parámetros de anchura de haz, solape (si es necesario) y velocidad apropiados para lograr los objetivos del tratamiento, según se describió en el apartado 3.4.
- Determinados los parámetros de proceso, se calcula la situación del punto más caliente usando los números adimensionales según el apartado 3.2.
- Con el pirómetro ya situado en la posición del punto más caliente se registra la respuesta del sistema a un escalón (para una potencia que genere una temperatura de régimen del orden de la que se va a exigir como referencia en el proceso que tratamos de realizar posteriormente), según se describió en el apartado 5.7.2, para determinar las características dinámicas del mismo (tiempo de retardo y la constante de tiempo del sistema). Posteriormente se sintoniza el sistema y el regulador PID queda disponible para su uso.

## Capítulo 6

# Validación experimental y análisis de resultados

En el capítulo anterior se ha comprobado que el sistema de control una vez sintonizado es capaz de mantener la temperatura superficial estable dentro de un estrecho margen del 5 % alrededor del valor de referencia elegido. Pero para validar su uso en tratamientos térmicos superficiales por láser hay que comprobar el resultado obtenido realizando medidas de dureza sobre la pieza tratada.

Los desarrollos teóricos comentados en anteriores capítulos para la aplicación de procesos de tratamiento térmico superficial de materiales metálicos con láser de potencia, así como los modelos utilizados para la predicción de los resultados de procesos de temple sirvan de ayuda para sacar conclusiones sobre la validez del sistema de control desarrollado experimentalmente, comparando los resultados de las simulaciones con los resultados reales de los procesos utilizando el sistema de control en tiempo real.

Esta validación experimental se ha llevado a cabo con la realización de procesos experimentales de temple superficial de acero F114 en dos configuraciones geométricas: pieza plana rectangular y pieza cilíndrica.

### 6.1 Condiciones experimentales

#### 6.1.1 Características del material empleado

Para la realización de los procesos de temple se ha seleccionado un acero al carbono con denominación F114 o sus equivalentes AISI C1045, DIN C45, 06A42 o BS EN8, entre otras. Se trata de un acero hipoeutectoide muy común, que es templable en agua, obteniéndose unas características mecánicas buenas. El temple permite aumentar



la dureza desde entre 200 y 275 Vickers hasta 600 ó 700 Vickers en función de las condiciones del temple. Su composición es de 0.30 % al 0.40 % de carbono, 0.40 % al 0.70 % de manganeso, trazas de silicio, fósforo y azufre (total 0.20 % al 0.30 %) y el resto hierro.

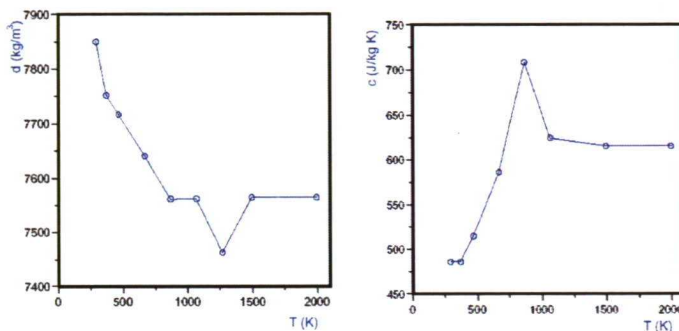


Figura 6.1: *Densidad (izquierda) y capacidad calorífica (derecha) del acero AISI 1045 en función de la temperatura [SMITHELLS 1992].*

Las gráficas 6.1 y 6.2 muestran la dependencia de tres de sus propiedades térmicas (densidad, capacidad calorífica y conductividad térmica) con la temperatura.

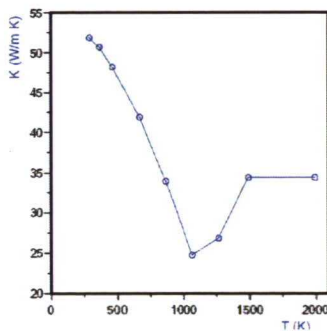


Figura 6.2: *Conductividad térmica del acero AISI 1045 en función de la temperatura [SMITHELLS 1992].*

Conviene señalar que en las tres gráficas el punto correspondiente a la temperatura de 2000 K es ficticio pero es necesario para que el programa de elementos finitos no presente fallos indeseados en aquellas zonas donde no están definidas las propiedades térmicas.

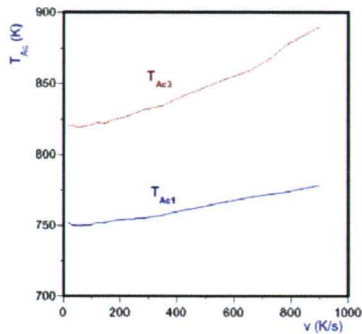


Figura 6.3: Temperaturas de transformación de fase en función de la velocidad de calentamiento [FARIAS 1991].

En la figura 6.3 se ve como evolucionan las temperaturas  $T_{Ac1}$  (inicio de la transformación de la perlita en austenita) y  $T_{Ac3}$  (inicio de la transformación de la ferrita en austenita) en función de la velocidad de calentamiento del material.

## 6.2 Tratamiento de geometría plana

### 6.2.1 Dispositivo experimental para probeta plana

Se entiende por geometría plana un paralelepípedo de dimensiones 60 mm  $\times$  40 mm  $\times$  10 mm. Siendo la dimensión mas pequeña en dirección Z.

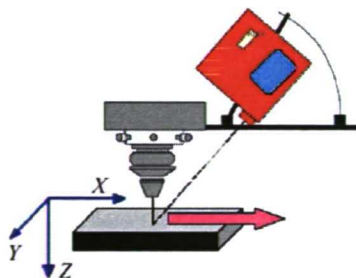


Figura 6.4: Esquema del montaje para pieza plana. El pirómetro (rojo) permite la lectura de la temperatura en tiempo real.

El montaje para el tratamiento de una geometría plana se refleja en la figura 6.4. En ella se indican los ejes de referencia a los que mas adelante se referirán las medidas. El eje del láser se desplaza según el eje  $X$  y la profundidad  $Z$  es en el sentido perpendicular a la superficie donde incide el haz (entendiendo que  $z = 0$  es la superficie y valores de  $Z$  crecientes indican capas mas profundas hacia el interior de la probeta).

### 6.2.2 Metodología

La validación experimental del sistema de control en tiempo real para el tratamiento térmico superficial de una pieza plana de un material metálico, desarrollada en este trabajo de tesis, se ha realizado en varias etapas:

- Obtención, mediante el uso de modelos numéricos según 3.4, de los valores adecuados de los parámetros del procesado con láser (potencia, velocidad relativa haz pieza y anchura del haz del modo TEM01\*).
- Determinación de la situación del punto de mayor temperatura para la alineación del pirómetro, por el método de los números adimensionales descrito en apartado 3.2.
- Determinación de la absorptividad del acero, usando la temperatura del cambio de fase, ya descrita en apartado 4.5.1, obteniéndose un valor para este acero, con la probeta recubierta con pintura negra mate, de  $\alpha = 51 \pm 2 \%$ .
- Simulación con el código de elementos finitos ANSYS<sup>TM</sup> considerando las propiedades del material dependientes de la temperatura.
- Tratamiento de la probeta con el sistema láser a potencia constante.
- Tratamiento de la probeta con el sistema láser controlado por el regulador en tiempo real, previamente sintonizado.
- Análisis de resultados en dos fases:
  1. Preparación de la probeta para medida de durezas.- Consta de corte de una muestra, embutido, pulido y medición de durezas mediante microdurómetro, de características descritas en el anexo B.
  2. Comparación con la dureza teórica de la distribución de dureza.- Esto se basa en un modelo numérico, donde las transformaciones de fase se aproximan por medio de pasos isoterms y otros de transformación constante mediante las fórmulas de Kirkaldy, y construyendo un mapa de durezas con la distribución de temperatura obtenida de los elementos finitos [DOANE 1977], [MELANDER 1985], [WANG 2000].

### 6.2.3 Búsqueda de parámetros del proceso

Para el temple del material se deben determinar los parámetros que nos permitan realizar el tratamiento con las exigencias requeridas. Se utilizará el método analítico para obtener una relación entre la potencia, velocidad relativa haz pieza, anchura del haz, dimensiones de la isoterma  $T_{Ac3}$  y la máxima temperatura alcanzada.

Ante tal variedad de parámetros que afectan al resultado, hay que tomar previamente algunas decisiones:

- Se elige una potencia de 1900 W, que deja un margen para el control hasta la máxima de 2200 W.
- Se toma una anchura de haz de  $\omega = 3$  mm, suficientemente ancha para que la zona templada permita realizar de forma cómoda una comparación del mapa de medidas experimentales con las estimaciones teóricas de dureza.
- De la bibliografía [SMITHELLS 1992], se tomaron las propiedades termofísicas del acero F114 para una temperatura de 1500 K, que supera ampliamente la temperatura crítica  $A_{c3} = 1162.9$  K;  $\kappa = 34.4$  W m<sup>-1</sup> K<sup>-1</sup>;  $c = 615$  J kg<sup>-1</sup> K<sup>-1</sup> y  $\rho = 7564$  kg m<sup>-3</sup>.

Con estos datos iniciales y aplicando el método de los números adimensionales visto en el apartado 3.2, se obtienen un conjunto de resultados (ver tabla 6.1) que relacionan la velocidad relativa, temperatura máxima y las coordenadas de este punto. El valor de  $X_{m\acute{a}x}$  representa la distancia desde el centro del haz al punto de mayor temperatura.  $Y_{Ac3}$  y  $Z_{Ac3}$  son las anchuras máximas de la isoterma  $T_{Ac3}$  en las direcciones Y y Z.

Tabla 6.1: *Casos particulares para distintos valores de velocidad.*

$T_{fusión} = 1723$ K				
V (mm/s)	$T_{m\acute{a}x}$ (K)	$X_{m\acute{a}x}$ (mm)	$Y_{Ac3}$ (mm)	$Z_{Ac3}$ (mm)
0	2338.8	-1.80	4.69	2.94
5	1841.7	-2.27	3.09	0.98
10	1542.5	-2.49	2.29	.40
15	1376.1	-2.61	1.06	.11
20	1247.5	-2.71	0.00	0.00

A partir de estos valores, elegimos la velocidad con determinados criterios:

- Se desechan las velocidades de 0 mm/s y de 5 mm/s porque la temperatura máxima supera la de fusión (1723 K).
- En el resto de los casos, la región templada mas ancha es para la velocidad de 10 mm/s.



La variable  $X_{máx}$  nos sirve para conocer a qué punto debemos apuntar el pirómetro para asegurar que tenemos controlado el punto de mayor temperatura de la pieza.

Los valores de los parámetros del proceso se resumen en la tabla 6.2

Tabla 6.2: *Dimensiones de la probeta y parámetros del tratamiento.*

Dimensiones	60x40x10 mm <sup>3</sup>
Potencia	1900 W
Coefic. Absorc.	51 %
Vel. relativa	10 mm / s
Anchura del modo ( $\omega$ )	3 mm
Temperatura inicial	300 K

Este conjunto de parámetros son los que se van utilizar tanto con el método de elementos finitos como en el tratamiento a potencia constante.

#### 6.2.4 Método de los elementos finitos

En base a los efectos sobre los resultados finales del tamaño y la distribución de las celdas ya comentados en la página 92, se eligió un tipo de mallado anisótropo, de dimensiones 1 mm  $\times$  1 mm  $\times$  0.1 mm en las proximidades de la superficie sobre la que incide el láser y de 1 mm  $\times$  1 mm  $\times$  1 mm en las zonas mas alejadas, lo que conlleva un ahorro importante de nodos. Para aumentar la discretización se debe elegir un mallado mas denso en la parte central de la superficie como se indica en la figura 6.5 y se toma un paso temporal de  $9.8 \times 10^{-3}$  s. La sección intermedia para  $x = 3$  mm, es la seleccionada para posteriores estudios de las isothermas y estimación de durezas.

#### 6.2.5 Resultados a potencia constante

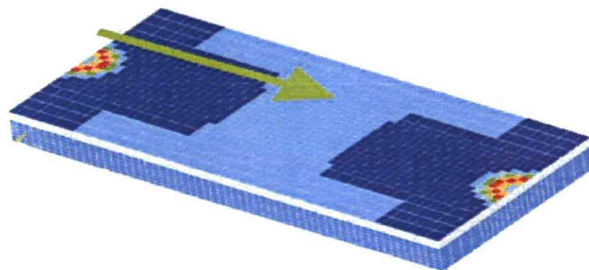


Figura 6.5: *Disposición del mallado para FEM.*

En la figura 6.6 se representan los resultados comparativos obtenidos con la simulación numérica y un registro experimental. En los datos calculados se aprecian unas oscilaciones achacables al efecto de la malla sobre la discretización del eje en movimiento. Así para la región reticulada con malla gruesa el periodo de oscilación es de 0.1 s y de 0.05 s para la discretización fina.

En las medidas experimentales se aprecia que hay un ligero efecto del tamaño finito de la pieza que hace que la temperatura no alcance un estacionario sino que tiene una primera subida muy rápida y luego una leve tendencia a mantener una temperatura sobre 1250 °C (1523 K), para acabar con una ligera subida, achacable al efecto borde al ir acercándose al borde final de la probeta.

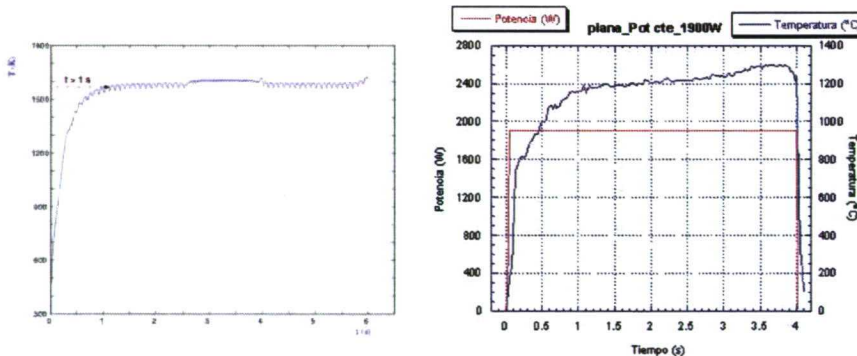


Figura 6.6: *Evolución de la temperatura de una pieza plana por simulación (izquierda) y datos experimentales (derecha).*

Sin embargo se pueden ver que los resultados son muy similares (en la pieza real se corta a 4.6 s por limitaciones del tamaño de la probeta) en cuanto a la temperatura alcanzada de 1570 K (1290 °C).

Apreciadas estas diferencias se ve aconsejable utilizar el sistema de control en tiempo real para asegurar durante el experimento la temperatura superficial de la probeta se mantiene constante y por tanto, los resultados serán mas parecidos a los obtenidos de la simulación para posterior comparación entre las durezas calculadas y las medidas.

### 6.2.6 Resultados a potencia controlada por regulador PID

Primero se presentan los resultados de los cálculos numéricos para finalmente compararlos con los resultados experimentales. Con el fin de poder comparar con los resultados

obtenidos a potencia constante, elegimos como valor de la temperatura de referencia el valor medio de la temperatura medida en el tratamiento a potencia constante que son 1250 °C (1523 K).

Para llegar a tener una estimación del mapa de las durezas obtenidas de una sección (elegida en la mitad de recorrido en la dirección  $x$ , indicada con una flecha en la figura 6.5, para prevenir los efectos del comienzo del tratamiento y los efectos de borde) se sigue el siguiente proceso:

- Cálculo de los ciclos térmicos, similar al mostrado en la figura 3.15 de los puntos tanto en superficie como en profundidad de la sección antes elegida, así como del mapa de temperaturas en una sección, como las que se indican en la figura 6.7 (izq). En ésta y las siguientes figuras, el origen de coordenadas está situado coincidiendo con el centro del haz, representando  $z = 0$  un punto de la superficie y  $z$  creciente, puntos hacia el interior del material.

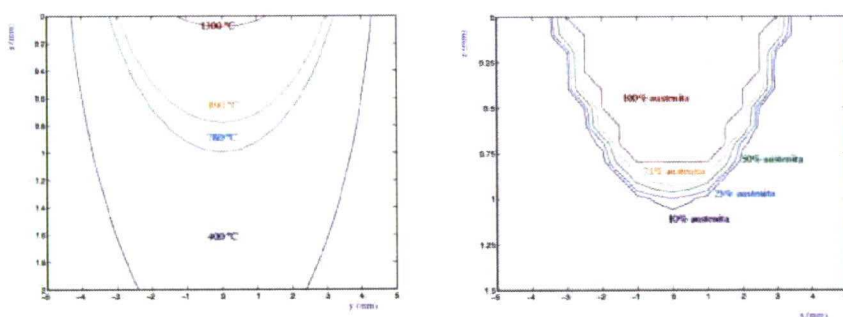


Figura 6.7: Mapa de temperaturas calculado en la sección estudiada (izq.) y distribución de la concentración de austenita al final del calentamiento (dcha.).

- Con estos ciclos térmicos y la relación de estos con la figura 6.3, se determinan los mapas de concentración de austenita al final del calentamiento, según se indica en la figura 6.7 (dcha) correspondiente para una sección de la probeta en su parte central.
- El paso siguiente consiste en el cálculo de un mapa de distribución de la martensita a partir de los ciclos térmicos antes determinados. En la figura 6.8 izquierda, se representa el mapa de concentraciones para la sección de la probeta. Las diferentes líneas separan zonas con la misma concentración. La línea marrón (mas

próxima a la superficie) contiene un 90 % de martensita, la naranja un 75 % y así hasta la línea azul marino cuya concentración es de un 10 %.

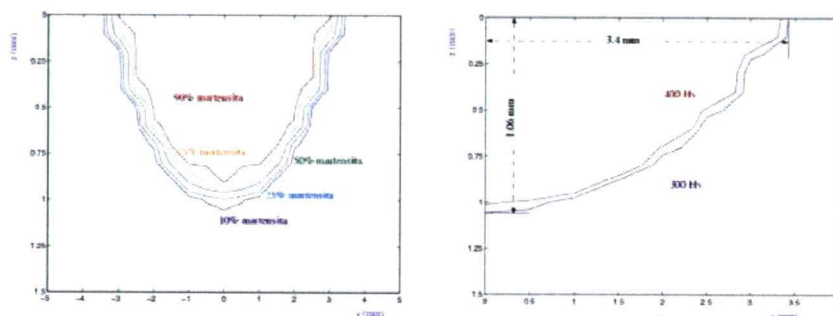


Figura 6.8: Mapa de concentración de martensita de una sección (izq). Las líneas señalan desde la marrón (90 %) a la azul (10 %) y mapa de durezas calculadas (dcha) para una mitad de la sección tratada. La dureza del material sin tratar está entre 200 HV y 250 HV.

La temperatura de la pieza al final del tratamiento (despreciando las pérdidas por convección y radiación) se estimó en 367 K por simple cálculo calorimétrico (habiendo obtenido en medidas experimentales temperaturas en el entorno de 340 K a 375 K). Este dato es el utilizado para completar el cálculo de formación de martensita.

- En la figura 6.8 derecha, se puede ver el mapa de durezas que resulta de aplicar las relaciones entre concentraciones de martensita y velocidades de enfriamiento al mapa de concentración de fases para una mitad de la sección de la pieza templada. Se indican con colores las curvas que limitan regiones con igual dureza que van de 400 HV (color rojo) a 300 HV (color azul).

Se puede ver que las dimensiones de la zona tratada (considerándola como aquella que tiene una dureza igual o superior a 300 HV) resultan ser de 6.8 mm de ancho y 1.06 mm de profundidad. Siendo la máxima dureza calculada de 820 HV.

- A continuación se presentan los resultados experimentales. Como ya se comentó anteriormente, se elige como valor de la temperatura de referencia para el regulador, el valor medio de la temperatura medida en el tratamiento a potencia constante que son 1250 °C (1523 K). En primer lugar, en la figura 6.9 izquierda, se muestra el registro de la evolución de la temperatura, así como el valor de



la potencia láser ajustada de modo automático con el regulador en tiempo real. También se representa el valor de la referencia elegida de 1250 °C.

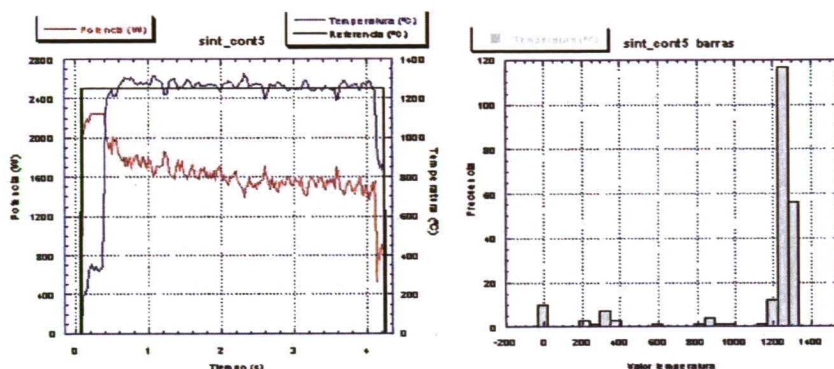


Figura 6.9: Evolución de la potencia y la temperatura en tratamiento de pieza plana con regulador en tiempo real (izquierda) y gráfico de frecuencias para la evolución de la temperatura (derecha).

Se observa que mientras al principio del tratamiento el regulador pide la potencia máxima disponible para alcanzar la temperatura elegida como referencia en el menor tiempo posible, a medida que el proceso continúa, la potencia demandada para mantener la temperatura constante va disminuyendo progresivamente, como era de esperar. En la parte final del tratamiento se llega a una potencia de 1500 W, inferior a los 1900 W que tendríamos si el tratamiento se hubiera hecho a potencia constante como en la simulación. La diferencia es que ahora se parte de la potencia máxima durante casi 500 ms con lo que se eleva la temperatura mas rápidamente y luego solo se aplica la potencia necesaria para mantenerla.

Como se puede apreciar en la parte derecha de la figura 6.9, el regulador mantiene la temperatura superficial constante alrededor del valor de referencia seleccionado (1250 °C), asegurando que los ciclos térmicos, tanto de la superficie como en el interior son similares a los obtenidos en la simulación.

Además, al mantener la temperatura superficial constante, el perfil de dureza obtenido es practicamente independiente de la sección tomada, mientras que a potencia constante se obtienen diferentes perfiles de dureza en función de las diferentes temperaturas, que van variando a lo largo del tratamiento. Así sobre la probeta se obtiene el mismo perfil de durezas en el centro que hacia el final del recorrido del haz ya que en las diferentes secciones tienen lugar los mismos ciclos térmicos (salvo en el recorrido

correspondiente a los 200 ms iniciales) eliminando por tanto, el posible efecto borde al ir acercándose hacia el final de la pieza.

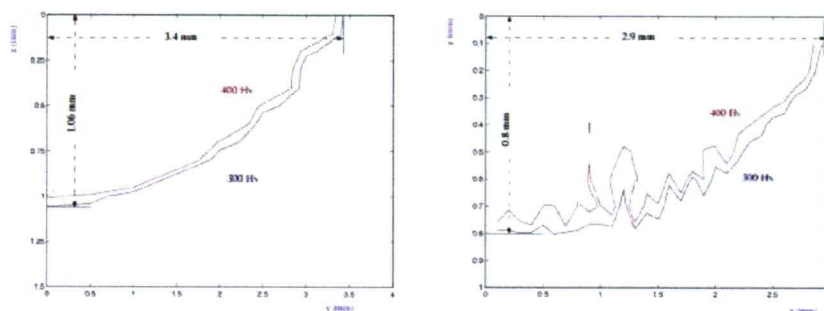


Figura 6.10: Mapa de durezas y dimensiones calculadas (izq) experimentales (dcha) de la zona endurecida en sección central del recorrido.

En la parte izquierda de la figura 6.10 se muestra el mapa de dureza calculado y en la derecha el medido experimentalmente. Como se puede ver, las dimensiones de la zona tratada son de unos 5.8 mm de ancho y 0.8 mm de profundidad, frente a los 6.8 mm de ancho y 1 mm de profundidad obtenido por cálculo. Estos errores representan un 15 % menor de anchura templada real y un 20 % menor de profundidad templada real.

También se observan algunas irregularidades en las curvas que limitan zonas de diferentes valores de la dureza medida, achacables al uso de cargas de prueba ligeras cuya huella y por tanto, la medida resultante, es sensible a la posible presencia de nódulos de carbono.

El análisis de estos datos indica que se aprecian las ventajas del uso combinado de simulaciones con los experimentos, ya que, al permitir predecir con un grado de exactitud mejor que el 20 %, permite realizar la búsqueda de parámetros partiendo de un entorno muy cercano al objetivo deseado. Posteriormente el uso de un sistema de control en tiempo real nos permite mantener una temperatura mas constante en la mayor parte del tiempo de tratamiento con lo que el resultado final es mas uniforme en cualquier punto de la probeta.

### 6.3 Tratamiento de geometría cilíndrica

#### 6.3.1 Dispositivo experimental para probeta cilíndrica

Si en una pieza plana el resultado obtenido con la potencia controlada con el regulador en tiempo real es buena, en la geometría cilíndrica todavía es de esperar mejor resultado.

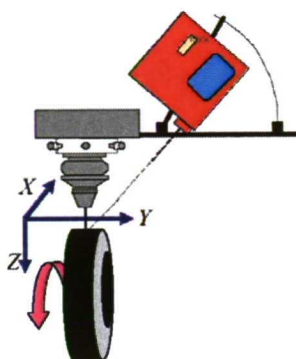


Figura 6.11: Esquema del montaje para el tratamiento de pieza de geometría cilíndrica.

El montaje para el tratamiento de una geometría cilíndrica se refleja en la figura 6.11. En ella se indican los ejes de referencia a los que mas adelante se referirán las medidas. El eje del láser se desplaza según el eje  $X$  y la profundidad  $Z$  es en el sentido perpendicular a la superficie donde incide el haz (entendiendo que  $z = 0$  es la superficie y valores de  $z$  crecientes indican capas mas profundas hacia el interior de la probeta).

#### 6.3.2 Metodología

La validación experimental del sistema de control en tiempo real para el tratamiento térmico superficial de una pieza de geometría cilíndrica de un material metálico, desarrollada en este trabajo de tesis, se ha realizado en varias etapas:

- Obtención, mediante el uso de modelos numéricos según 3.4, de los valores adecuados de los parámetros del procesado con láser (potencia, velocidad relativa haz pieza y anchura del haz del modo TEM01\*).
- Determinación de la situación del punto de mayor temperatura para la alineación del pirómetro, por el método descrito en el apartado 3.2.

- Determinación de la absorptividad del acero, usando la temperatura del cambio de fase, ya descrita en el apartado 4.5.1, obteniéndose un valor para este acero, con la probeta recubierta con pintura negra mate, de  $\alpha = 51 \pm 2 \%$ .
- Simulación con el código de elementos finitos ANSYS<sup>TM</sup> considerando las propiedades del material dependientes de la temperatura.
- Tratamiento de la probeta con el sistema láser a potencia constante.
- Tratamiento de la probeta con el sistema láser controlado por el regulador en tiempo real, previamente sintonizado.
- Análisis de resultados en dos fases:
  1. Preparación de la probeta para medida de durezas.- Consta de corte de una muestra, embutido, pulido y medición de durezas mediante microdurómetro, de características descritas en el anexo B.
  2. Comparación con la dureza teórica de la distribución de dureza.- Esto se basa en un modelo numérico, donde las transformaciones de fase se aproximan por medio de pasos isoterms y otros de transformación constante mediante las fórmulas de Kirkaldy, y construyendo un mapa de durezas con la distribución de temperatura obtenida de los elementos finitos [DOANE 1977], [MELANDER 1985], [WANG 2000].

### 6.3.3 Búsqueda de parámetros del proceso

Para el temple del material se deben determinar los parámetros que nos permitan realizar el tratamiento con las exigencias requeridas. Se utilizará el método analítico para obtener una relación entre la potencia, velocidad relativa haz pieza, anchura del haz, dimensiones de la isoterma  $T_{Ac3}$  y la máxima temperatura alcanzada.

Los valores de los parámetros del proceso, una vez determinados por simulación y calculado el coeficiente de absorción por el método descrito en 4.5.1, se resumen en la tabla 6.3:

Tabla 6.3: *Dimensiones de la probeta cilíndrica y parámetros del tratamiento.*

Dimensiones	$\phi 45 \text{ mm} \times 60 \text{ mm}$ (largo)
Potencia	1700 W
Coefic. Absorc.	57 %
Vel. relativa	10 mm / s
Anchura del modo ( $\omega$ )	3 mm
Temperatura inicial	300 K



### 6.3.4 Resultados obtenidos a potencia constante

Con este tipo de geometría los problemas que aparecen son mayores que la suave y progresiva elevación de la temperatura que tenía lugar en el caso de la probeta plana. Tal y como hemos visto en figura 3.11 y en la figura 6.12 se muestra para este caso los resultados del modelo teórico (izquierda) y experimentales (derecha), a medida que se completa cada vuelta, la temperatura superficial sufre un incremento debido a que el láser incide cerca de una superficie que ya ha sido tratada anteriormente y que todavía está a una temperatura mayor que la ambiente cuando recibe un nuevo aporte de energía, alcanzando una temperatura final mayor que si hubiera partido de temperatura ambiente.

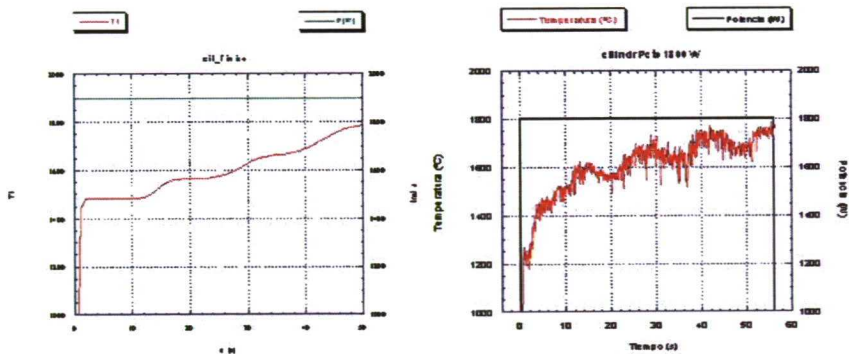


Figura 6.12: Evolución de la temperatura de pieza cilíndrica con recorrido en hélice a potencia constante de 1800 W calculada (izq) y experimental (dcha).

Además de este efecto, que ya sería detectable al completar una sola vuelta, se agrava por la necesidad de que para lograr realizar el tratamiento en un ancho mayor que el máximo diámetro del haz láser, obliga a realizar un recorrido en hélice, de modo que manteniendo cierto solape entre vueltas consecutivas, se asegure un tratamiento lo mas uniforme posible de toda la superficie. Así, en caso de ser necesario efectuar mayor número de vueltas, la temperatura alcanzada es cada vez mayor, pudiendo llegar a la de fusión, con el deterioro consecuente de la pieza bajo tratamiento.

6.3.5 Resultados obtenidos con potencia en rampas

Una de las soluciones ya propuestas es aplicar escalones decrecientes de potencia. Los escalones necesarios que se deben aplicar a medida que se completa cada vuelta para obtener una temperatura constante, se pueden calcular mediante simulación. En la figura 6.13 se muestra el perfil de potencias y rampas correspondientes en función del tiempo que se obtienen de la simulación al imponer la condición de mantener temperatura constante. Así mismo, en la tabla 6.4 se dan los valores de las rampas (potencia y tiempos) programados en el armario de control del láser para tratar de obtener temperatura constante a lo largo del proceso. Según esta tabla, el láser entrega 1790 W durante 11.9 s. A continuación realiza una rampa de duración 5.03 s entre 1790 W y 1700 W, luego permanece con 1700 W durante 8.2 s. Otra rampa de 6.88 s entre 1700 W y 1641 W, mantenimiento de 1641 W durante 7.66 s. para finalizar con otra rampa de 8.45 s bajando desde 1641 W y 1600 W.

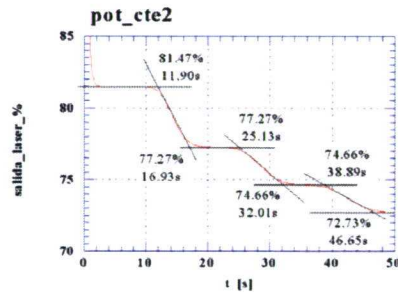


Figura 6.13: Potencia en rampas decrecientes obtenidas por simulación.

Tabla 6.4: Rampas programadas en el láser: potencia/tiempo.

%	81.4	77.3	77.3	74.6	74.6	72.7
potencia (W)	1790	1700	1700	1641	1641	1600
tiempo (s)	11.9	5.03	8.2	6.88	7.76	8.45

Las simulaciones también nos permiten determinar los ciclos térmicos que van a ocurrir para un punto determinado por los sucesivos pases del láser, en una de las pasadas coincidiendo por encima y en las vueltas anteriores y posteriores, por puntos mas alejados pero que dejan sentir su influencia en mayor o menor medida.

En la figura 6.14 se representa la evolución de la temperatura cuando se aplica la potencia en rampas calculada por simulación (izquierda) y los resultados experimentales (derecha) . Se ve que el resultado teórico para la temperatura es un valor casi

constante con una ligera tendencia a subir en la última vuelta. En el registro experimental se observa, por una parte, que la temperatura se mantiene en el entorno de  $1400\text{ }^{\circ}\text{C}$  y ya no crece indefinidamente como ocurriría cuando se aplicaba potencia constante. Se superpone otro efecto dentro de cada vuelta donde la temperatura tiende a subir mientras la potencia láser permanece constante. Esta evolución de la temperatura dentro de cada vuelta tiene su reflejo en el mapa de dureza obtenido como se verá mas tarde. Se puede apreciar la ventaja que supone esta evolución de temperatura controlada y limitada ya que, aunque fuese necesario dar mas vueltas no se alcanzaría la temperatura de fusión que inutilizaría la pieza.

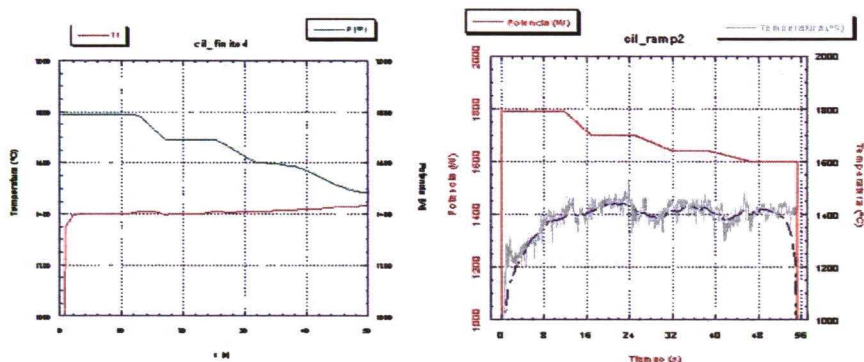


Figura 6.14: Evolución de la temperatura para potencia en rampas obtenida por simulación (izq) y datos experimentales (dcha).

Los ciclos térmicos que tienen lugar para cada punto de la pieza bajo tratamiento se pueden determinar teóricamente mediante cálculo. Ciclos de este tipo ya se han mostrado en la figura 3.13. Con estos ciclos se puede determinar cual es el solape mas adecuado para que se alcance un ciclo térmico que permita alcanzar la dureza exigida a la vez que se trata de evitar un posterior recocido de una parte previamente endurecida.

Además el estudio de esos ciclos, para diferentes valores de velocidad y ancho del haz, permite evaluar en qué rangos de parámetros del tratamiento (potencia, velocidad, anchura de haz) se debe trabajar para lograr los fines propuestos.

Si no se hiciera de esta manera, la búsqueda sistemática de parámetros implica la realización de innumerables tratamientos y el posterior análisis de resultados (obtención de secciones de la pieza, preparado, pulido y medida de durezas), que conllevan

un elevado gasto de material y tiempo.

De todos modos este es un sistema válido sino se dispone de un sistema de control en tiempo real como se verá en los resultados experimentales en el apartado 6.3.7.

### 6.3.6 Resultados a potencia controlada por regulador PID

Al realizar un tratamiento a una superficie cilíndrica mediante rampas decrecientes se necesita programar estas rampas en el armario de control del láser. La capacidad de programación de equipos industriales suele estar limitada, en nuestro caso a siete intervalos de tiempo. Como se ha visto en el apartado anterior, para poder realizar 3 vueltas y media sobre la pieza ya se ha alcanzado este límite por necesitar una potencia diferente para cada vuelta mas tres ramos en rampa para unir las diferentes potencias. En caso de necesitar realizar un tratamiento mas ancho, dada la limitación existente que supone la potencia limitada del láser, no se podría realizar por este método.

Este problema se evita cuando el tratamiento se realiza bajo la supervisión del sistema de control en tiempo real en el que solo necesitamos fijar la temperatura de referencia y los parámetros de velocidad, diámetro de haz y solape previamente obtenidos de la simulación. El sistema podrá asegurar el control de la temperatura independientemente del número de vueltas que tengamos que realizar.

En la figura 6.15 (izquierda) se muestra el registro de temperatura y potencia obtenido en un proceso de tratamiento controlado por el sistema de control en tiempo real con una temperatura de referencia de 1400 °C.

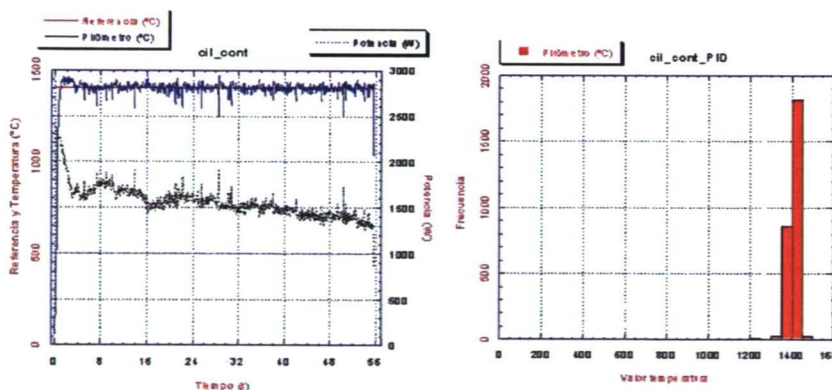


Figura 6.15: Evolución de la temperatura y la potencia con el regulador PID (izq) y gráfico de barras para la temperatura (dcha).



Se puede apreciar que, salvo la brusca demanda inicial de potencia hasta la máxima disponible en el equipo láser que permite alcanzar la temperatura deseada en el menor tiempo posible (destacar que a potencia constante le llevaba del orden de 8 s en alcanzar esta temperatura), luego hay una disminución de potencia, apreciándose una ligera subida en la primera vuelta, seguida de una reducción al completar la primera vuelta. Esta evolución se repite en la segunda vuelta, pero de menor intensidad y en la tercera y cuarta, prácticamente inapreciable.

En la parte derecha de la figura 6.15 se presenta el gráfico de frecuencias de los valores de temperatura, pudiendo ver su permanencia en el entorno de  $\pm 50$  °C alrededor del valor de referencia elegido.

### 6.3.7 Mapa de durezas en cilindro

Se comparan, a continuación, los mapas de dureza obtenidos por simulación y los datos experimentales.

#### Resultados de la simulación y experimentales para una sección centrada en el máximo de la primera vuelta

Siguiendo el mismo proceso que en la pieza plana se determinan sucesivamente los ciclos térmicos y los mapas de temperaturas. De los anteriores y con la ayuda, la concentración de austenita formada. Con estos ciclos térmicos y la relación de estos con la figura 6.3, se determinan los mapas de concentración de austenita al final del calentamiento. El paso siguiente consiste en el cálculo de un mapa de distribución de la martensita a partir de los ciclos térmicos antes determinados.

El mapa de durezas que resulta de aplicar las relaciones entre concentraciones de martensita y velocidades de enfriamiento al mapa de concentración de fases correspondiente a una región centrada respecto al máximo de temperatura de la primera vuelta se muestra en la figura 6.16 (izquierda). En la parte derecha de la misma figura se muestran las durezas medidas experimentalmente para una sección similar. Se indican con colores las curvas que limitan regiones con igual dureza que van de 400 HV (color rojo) a 300 HV (color azul).

Se puede ver que las dimensiones de la zona tratada por cálculo (considerándola como aquella que tiene una dureza igual o superior a 300 HV) resultan ser de 6.8 mm de ancho y 1.25 mm de profundidad. El mapa de durezas y dimensiones experimentales obtenido se muestra en la figura 6.16 (derecha) para la mitad de la sección de la primera vuelta y presenta unas dimensiones de 6.4 mm de ancho en la superficie y 1.15 mm de profundidad máxima. el valor máximo de dureza alcanzado es de 856 HV.

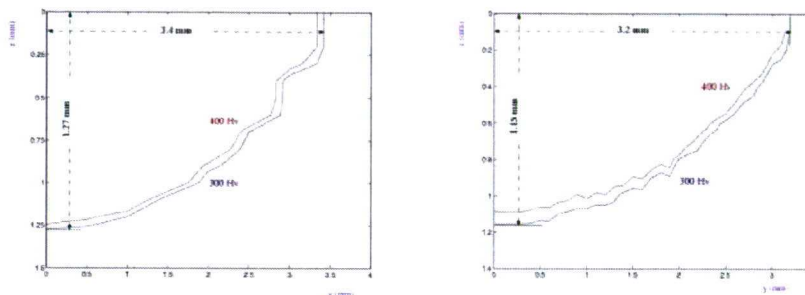


Figura 6.16: *Curvas de isodureza a intervalos de 100 HV, para una sección. Izquierda: calculos por simulación. Derecha: medidas experimentales.*

### Resultados de simulación y datos experimentales en la superficie del ancho tratado

Efectuando medidas de dureza a lo largo de todo el ancho de la pieza se obtienen durezas variables ya que dependen de los ciclos térmicos reales en cada punto de la sección. Como las pasadas sucesivas influyen sobre el tratamiento previamente realizado sobre las zonas adyacentes, la dureza final en una zona de la superficie viene determinada no solo por el ciclo térmico correspondiente cuando el láser incide centrado sobre esa zona en la vuelta correspondiente sino también en las pasadas anterior y posterior.

Además si los ciclos térmicos de la zona sobre la que incide el centro del haz no son iguales debido al efecto de la energía que se va acumulando en la pieza, el efecto de pasadas sucesivas será todavía mayor. Esto se puede apreciar en los resultados de las medidas de dureza realizados en la superficie y que se representan en la figura 6.17. Se representan los valores de dureza a lo largo de una línea sobre la superficie de la pieza cilíndrica tratada por el método de la potencia decreciente en rampas (línea de trazos) y por otro los obtenidos con el tratamiento con el regulador PID (línea continua).

Como se puede ver, los valores de dureza que se obtienen con el proceso realizado con el PID son mas altos (entre 50 HV y 100 HV superiores) en todas las pasadas. Así mismo, los valores mínimos de dureza con el PID son mayores que en el tratamiento realizado con rampas de potencia y además se mantienen mas uniformes en las sucesivas vueltas.

Otro dato interesante es que el tratamiento con regulador PID minimiza la energía

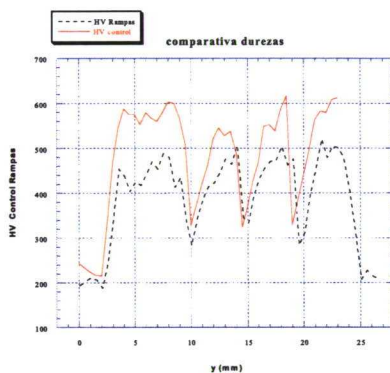


Figura 6.17: Comparativa dureza superficial obtenida con rampas de potencia (trazo discontinuo) y con regulador PID (trazo continuo).

total que se entrega a la pieza. Partiendo de los datos de potencia instantánea en cada caso y calculando la energía total entregada durante el tratamiento, se llega a que el tratamiento realizado con regulador en tiempo real necesita un 3,3 % menos de energía.

Se concluye, por tanto, que el tratamiento realizado con regulador PID presenta ventajas de valores mas elevados de dureza combinando con un tratamiento mas uniforme y optimización de energía.

### Resultados de simulación y datos experimentales en profundidad para cada máximo y mínimo

En la figura 6.18 se representan los valores obtenidos de dureza en profundidad siguiendo la vertical de cada máximo de la superficie. Se aprecia que los valores son siempre superiores en el tratamiento realizado con el regulador PID hasta una profundidad de 0,8 mm, siendo bastante similar entre 1 mm y 1,5 mm.

El hecho de que la dureza obtenida en el tratamiento realizado con potencia en rampas sea unos 100 HV menores se puede relacionar con la evolución de la temperatura en cada vuelta que sufre subidas y bajadas. También al ser la energía total entregada superior que en el otro tratamiento se produce un doble efecto: por un lado las velocidades de enfriamiento son menores porque el calentamiento global de la pieza es mayor y la elevación local de la temperatura en pasadas sucesivas produce un efecto de recocido sobre las zonas endurecidas previamente.

Algo similar ocurre con los valores mínimos. Hasta la profundidad de 0,8 mm son superiores los valores de dureza obtenidos con el tratamiento con regulador PID

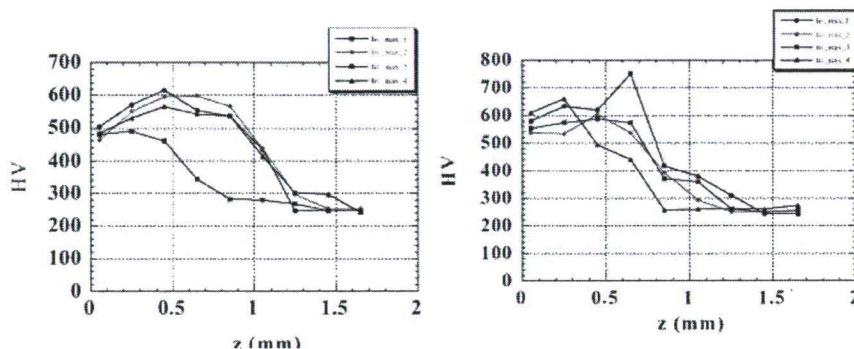


Figura 6.18: Máximos de dureza en profundidad en tratamiento con rampas (*izq*) y con regulador PID (*dcha*).

por estar mas afectados por los diferentes ciclos térmicos que tienen lugar en la zona mas superficial. A medida que nos alejamos de la superficie los resultados de ambos tratamientos son mas similares porque también los ciclos térmicos a mayor profundidad son mas parecidos en ambos casos.

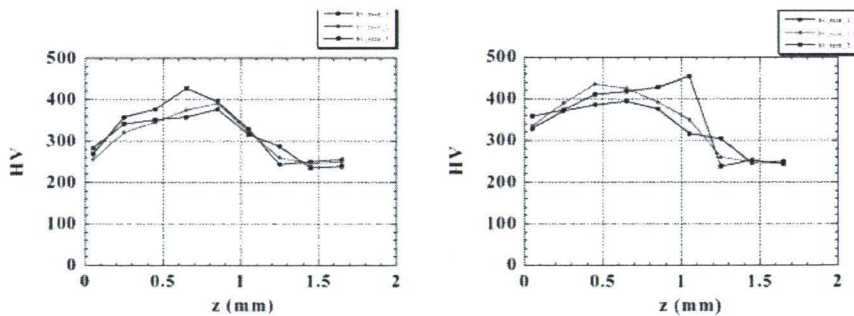


Figura 6.19: Mínimos de dureza en profundidad en tratamiento con rampas (*izq*) y con regulador PID (*dcha*).



## Capítulo 7

# Conclusiones, aportaciones y líneas de futuro

### 7.1 Conclusiones

Después de realizados los trabajos relativos a esta tesis, se puede concluir que se han alcanzado los siguientes objetivos:

1. Se ha demostrado que la combinación de modelos matemáticos y técnicas experimentales constituyen una herramienta eficaz con la que se pueden minimizar los costes de los experimentos así como predecir y tener un conocimiento mas amplio de la naturaleza de las modificaciones que estos tratamientos térmicos causan en los materiales.
2. Tanto el sensor propuesto así como el ordenador donde se implementó el regulador en tiempo real son utilizables dentro de un ambiente industrial ya que para esas condiciones han sido seleccionados. Solo en el caso del ordenador se necesitaría introducirlo en una cabina o elegir directamente un ordenador para ambiente industrial.
3. Se realizó un estudio pormenorizado de todos los parámetros o condiciones que pueden influir en las medidas realizadas con un pirómetro en un ambiente industrial, así como posibles problemas en función del tipo de cable utilizado para las señales y la forma de conexión para ayudar a evitarlas al implementar un sistema de control.
4. El soporte diseñado, cumple la función para sujección y movimientos requeridos en esta aplicación. Sirve además como idea de partida para realizar cualquier

otro adaptado a las características de otro pirómetro que se pueda elegir para otra aplicación industrial concreta.

5. El sistema de alineación que facilita apuntar el sensor pirométrico al punto mas caliente y que sirve como variable del proceso para su uso en el sistema de control en tiempo real, se puede adaptar a muchos modelos de pirómetros industriales.
6. Se ha determinado que para la realización de tratamientos térmicos con un regulador en tiempo real, el parámetro idóneo es la temperatura superficial y mas en concreto, la del punto mas caliente de la superficie y, en función de este, actuar sobre la potencia para mantener la temperatura constante. Por el contrario, la velocidad presenta el problema de que hace variar la situación del punto mas caliente sobre la superficie haciendo la medida del pirómetro poco significativa. Además varía el tiempo de respuesta del sistema con lo que la sintonización del regulador es mas difícil.
7. El regulador implementado en entorno LabVIEW, de amplio uso en la industria, asegura la portabilidad del sistema a la industria sin necesitar un periodo de formación demasiado extenso.
8. El regulador diseñado ayuda a obtener resultados uniformes y repetibles.
9. El sistema permite registrar en un archivo los valores de los parámetros durante el proceso (tiempo, potencia, temperatura) de modo que puedan servir para asegurar la trazabilidad de las piezas tratadas dentro de un programa de control de calidad de la producción.
10. Con el sistema de control se obtiene un tratamiento mas uniforme y con valores de dureza superiores que con cualquier otro método, a la vez que se optimiza el consumo de energía total empleada.

## 7.2 Aportaciones

También se puede concluir que, con los trabajos realizados para lograr los objetivos de esta tesis, se han llevado a cabo las siguientes aportaciones originales:

1. Se ha establecido un sistema para la determinación rápida del punto más caliente de la superficie en base a la utilización de números adimensionales calculados a partir de los valores de los parámetros de proceso, para el caso de superficies planas o asimilables.

2. Se ha establecido un sistema para la determinación de la anchura del haz láser en base a impactos realizados sobre metacrilato, referenciando las huellas obtenidas con la distribución transversal del modo TEM<sub>01</sub>\*, contrastándolo con medidas realizadas con analizador de haz. Finalmente se obtienen unas tablas que relacionan la distancia a partir del punto focal con la anchura correspondiente, para cada una de las lentes utilizadas. Estos datos son básicos cuando se quiere complementar y/o comparar el estudio de los tratamientos con simulaciones numéricas.
3. Se ha establecido un sistema para la determinación de la absorptividad efectiva de la superficie de un material en las condiciones en que va a realizar el tratamiento posterior, usando la temperatura del cambio de estado.
4. Se ha diseñado un soporte para el pirómetro que permite moverlo fácilmente en tres ejes, facilitando la alineación al punto mas caliente de la superficie.
5. Se ha diseñado un sistema de alineación, basado en la utilización de un láser auxiliar acoplado al pirómetro industrial, que ha sido objeto de una patente. Número de publicación: ES 2 178 606 A1. Fecha de prioridad: 23-04-01.
6. Se ha mostrado como se puede integrar fácilmente un sistema de control en tiempo real en un equipo láser industrial, aprovechando las ventajas del control a CNC para coordinar el comienzo del movimiento, el inicio de la radiación láser y el principio de la actuación del regulador PID, manteniendo los requisitos de seguridad tanto del sistema láser, como del operario del sistema, así como para asegurar que no se van a generar piezas defectuosas como consecuencia de una contingencia previsible: falta de gas de proceso o de aire comprimido, fallo en el sistema de refrigeración o del propio sistema láser.
7. Se ha demostrado la facilidad de implementar un control PID en base a programas comerciales ampliamente difundidos en la industria con lo que se asegura la facilidad de su exportabilidad a la industria.
8. Se ha comprobado que en casos de tratamientos que necesitan pasadas sucesivas o de geometrías complejas es fundamental el control en tiempo real para asegurar la uniformidad del tratamiento sin que este se vea afectado por los efectos de borde o efectos de volúmenes pequeños de material a tratar, que serían imposibles con proceso con potencia constante.

### 7.3 Líneas de futuro desarrollo

Al realizar los trabajos de esta tesis se han detectado las siguientes líneas de futuro trabajo y desarrollo:

1. Incorporación de un pirómetro de dos colores para independizar la medida de temperatura de la emisividad de la superficie. De este modo se evitaría el tener que llevar el material al punto de fusión para determinar su absorptividad efectiva.
2. Incorporar el sensor de temperatura a través de un divisor de haz para evitar problemas de alineación del sensor de temperatura cuando se varía la altura entre la pieza y el punto focal.
3. Posibilidad de ampliar el uso de este sistema de control a otros procesos donde se supere la temperatura de fusión: refusión, recubrimientos, etc.
4. Combinar la lectura pirométrica con otros sensores ópticos (cámaras CCD, CMOS, etc.) para evaluar el ancho de la zona fundida para procesos de refusión y otros donde se sobrepase el punto de fusión. Sistemas similares ya se usan en la industria pero sólo como control de calidad estando el reto en incorporarlos como elementos de un control efectivo en tiempo real.
5. Completar el estudio iniciado de un sistema PID en materiales con muy diferentes propiedades metalúrgicas (baja conductividad térmica, por ejemplo) que dispare la evolución de la temperatura ante pequeñas variaciones en la potencia.
6. Estudio de la aplicación del sistema de control al caso de piezas con geometrías complejas: piezas cilíndricas con diámetros variables, saltos bruscos de espesores en ejes (zona chaveteros), vértices agudos (bordes de los asientos de válvulas de motores), etc.



## Capítulo 8

# Bibliografía

# Bibliografía

- [ALVAREZ 2001] ALVAREZ, J.C.; RAMIL, A. y otros; *"Real time control and monitoring of laser hardening process: application to cylindrical work-pieces"*; Proceedings of the LANE 2001; pp. 223-234. (2001).
- [AMADO 2003] AMADO, J.M. ; ALVAREZ, J.C. y otros; *"Monitorización y modelización de procesos de refusión por láser de recubrimientos depositados por plasma"*; VII Congreso Nacional de Materiales; Madrid. (2002).
- [AMENDE 1984] W. AMENDE; *"Industrial applications of laser"*; Ed. H. Koebner, Wiley (Sussex). pp. 79-92. (1984).
- [APRAIZ 1997] APRAIZ, B.J.; *"Tratamientos térmicos de los aceros"*; CIE-Dossat 2000. (1997).
- [ARCHAMBAULT 1997] ARCHAMBAULT, P. et al. ; *"Inverse resolution of the heat-transfer equation with internal heat source: application to the quenching of steels with phase transformations"*; JMEPEG, 6: pp. 240-246. (1997).
- [ASHBY 1984] ASHBY, M. F.; EASTERLING, K. E. *"The transformation hardening of steel surfaces by laser beams"*. Acta Metall. (USA) 32 (11): 1935-48. (1984).
- [ASM 1995] ASM handbook; *"Metallography and Microstructures"*; Volume 9. pp. 165-169. (1995).
- [ASM 1991] ASM handbook; *"Heat treating"*; ASM International, Volume 4. (1991).
- [ASTRÖM 1997] ÅSTRÖM, K.J.; WITTENMARK, B.; *"Computer controlled systems, theory and design"*; Prentice-Hall, Englewood Cliffs, U.S.A. (1997).

- [AUSLANDER 1996] AUSLANDER, D.M. y otros; "*Real time software for implementation of feedback control*"; The Control Handbook; CRC Press & IEEE Press. (1996).
- [AVNER 1988] AVNER, S.H.; "*Introducción a la Metalurgia Física*"; McGraw-Hill. pp. 234-237. (1988).
- [BACHS 1988] BACHS, L. y otros; "*Aplicaciones industriales del láser*"; Marcombo. (1988).
- [BERGMANN 1993] BERGMANN, H. W.; "*Surface treatment*"; Euro Laser Academy; Erlangen-Germany. (1993).
- [BERGMANN 1988] BERGMANN, H.W. y GEISSLER, E.; *2<sup>nd</sup> European Conference on Laser Treatment of Materials*; ECLAT'88; Dusseldorf; Alemania; pp. 109-113. (1988).
- [BIERMANN 1991] BIERMANN, S. y GEIGER, M.; "*Integration of diagnostics in high power laser systems for optimization of laser material processing*"; Proceedings of the Conference on Modeling and Simulation of Laser Systems II, Los Ángeles; U.S.A.; SPIE 1415. (1991).
- [BIELER 1988] BIELER, H. W., HERZIGER, G. y WISSENBAACH, K.; *2<sup>nd</sup> European Conference on Laser Treatment of Materials*; ECLAT'88; Dusseldorf; Alemania. pp. 46-53. (1988).
- [BRAZ 1985] BRAZ; F. M. et al.; "*Mathematical model coupled phase transformation and temperature evolution during quenching of steels*"; Materials Science and Technology; Vol 1, pp. 838-844. (1985).
- [BERTRAND 2000] BERTRAND, P.H.; SMUROV, I.; GREVEY, D.; "*Application of near infrared pyrometry for continuous Nd:YAG laser welding of stainless steel*"; Rev. Applied Surface Science ; Vol. 168; pp. 182-185. (2000).
- [CABRERA 1995] CABRERA, J. A. y otros; "*Algunas cuestiones sobre seguridad Láser*"; Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo. (1995).
- [CAILLIBOTTE 1992] CAILLIBOTTE, G.; "*Etude Expérimentale de la Refusion Superficielle des Métaux par Laser CO<sub>2</sub> Multikilowatta Continu*"; Tesis Doctoral; Univ. Paris. (1992).
- [CARLSLAW 1959] CARSLAW, H. S. y JAEGER, J. C.; "*Conduction of Heat in Solids*"; Oxford University Press. (1959).

- [CARRASQUILLA 1992] CARRASQUILLA, J. F. y LASHERAS, J. M<sup>a</sup>.; "*Ciencia de Materiales*"; Edit. Donostiarra. (1992).
- [CHAPMAN 1984] CHAPMAN, A. J.; "*Transmisión del calor*"; 3<sup>a</sup>ed., Bellisco. (1984).
- [CHUN 1970] CHUN, M. K.; "*Interaction of High-Intensity Laser Beams with Metals*"; Journal of Applied Physics; Vol 41, N<sup>o</sup>2. (Febrero 1970).
- [DAMBORENEA 2001] DAMBORENEA, J. J. de; "*Ciencia e Ingeniería de la Superficie de los Materiales Metálicos*"; CSIC, pp.197-209. (2001).
- [DOANE 1977] DOANE, D. V., Kirkaldy, J.S.; "*Hardenability with applications to steel*", Proceedings of a Symposium held at the Sheraton-Chicago Hotel; pp. 518-545. (October 1977).
- [DORF 1989] DORF, R.; "*Sistemas modernos de control*"; Addison-Wesley Iberoamericana. (1989).
- [DORRONSORRO 1996] DORRONSORRO MENDIGUREN, M.; "*La tecnología láser. Fundamentos, aplicaciones y tendencias*"; McGraw-Hill. (1996).
- [DULEY 1983] DULEY, W.W.; "*Laser Processing and Analysis of Materials*"; Plenum Press. (1983).
- [FABBRO 1987] FABBRO, R. y otros; "*Absorption Measurements in Continuous High-Power CO<sub>2</sub> Laser Processing of Materials*"; Proc. SPIE Vol. 801 High Power Lasers. (1987).
- [FAGOR 1997] FAGOR AUTOMACION, S. Coop. Ltda.; "*Manual de instalación y puesta en marcha Fagor 8050*". (1997).
- [FARIAS 1991] FARIAS, D. ; "*Traitement thermique laser de l'acier XC42 et modélisation des transformations de phases en cycles thermiques rapides au chauffage et au refroidissement*"; Thèse de doctorat; I.N.P.L., Nancy. (1991).
- [GALLEGO 1990] GALLEGO LLUESMA, E.; "*Procesamiento de materiales con láser de CO<sub>2</sub>*"; Artículo del libro "*Láser y Óptica en Ingeniería*"; editado por el CIOp. (1990).
- [GARCÍA 1996] GARCÍA Y BELTRÁN, A.; "*Desarrollo y validación de un modelo computacional para la predicción y caracterización de procesos de tratamiento térmico superficial de materiales con láser*"; Tesis Doctoral, E.T.S.I.I. de Madrid. (1996).



- [GARCÍA 1999] GARCÍA Y BELTRÁN, A. y OCAÑA, J.L.; "*Modelo numérico tridimensional para la simulación de procesos de tratamiento superficial de materiales con láser*"; Rev Metal; n°35, pp. 73-83. (1999).
- [GASSER 1987] GASSER, A. y otros; "*Capillary waves and Energy Coupling in Laser Materials Processing*"; SPIE Vol. 801; High Power Lasers. (1987).
- [GEBHART 1996] GEBHART, B.; "*Heat conduction and mass diffusion*"; McGraw-Hill. (1996).
- [GEIGER 1995] GEIGER, M.; "*Optimizing Laserforming by FEM-Simulation*"; Proc. 10<sup>th</sup> Meeting of the Working Group on Mathematical Modelling of High Power Laser Material Processing; Univ. Erlangen-Nuremberg. (1995).
- [GANAMUTHU 1985] GNANAMUTHU, D. S. y SHANKAR, V. S.; "*Laser Heat Treatment of Metals*"; Edit. G. W. Draper y P. Mazzoldi, Serie E: Applied Sciences, Martinus Nijhoff Publ. 115, pp. 521-543. (1986).
- [HALLIDAY 1993] HALLIDAY, D.; RESNICK, R. y WALKER, J.; "*Fundamentals of Physics*"; 4<sup>th</sup> Ed. John Wiley, New York. (1993).
- [HERRERO 1997] HERRERO ACEBES, F. A.; "*Concepción, diseño y desarrollo de un sistema de regulación en tiempo real de procesos industriales de tratamiento con láser*"; Tesis Doctoral, E.T.S.I.I. de Madrid. (1997).
- [HÜGEL 1993] HÜGEL, H y DAUSINGER, F.; "*Interaction Phenomena and Energy Coupling in Laser Treatment Processes*"; Proc. EuroLaser Academy, Aquisgrán. (1993).
- [INCROPERA 1999] INCROPERA, F.P. y DEWIT, D.P.; "*Fundamentos de transferencia de calor*"; Ed. Prentice Hall. (1999).
- [JAIN 1996] JAIN, P.K.; "*IR, visible and UV components in the spectral distribution of black body radiation*"; Phys, Educ. 31. (1996).
- [KECHEMAIR 1989] D. KECHEMAIR; *Tesis Doctoral*; Universidad de Paris-Sud, Centre D'Orsay. (1989).
- [KRAUSS 1995] KRAUSS, G.; "*Principles of Heat Treatment of Steel*"; Michigan UMI. (1995).
- [LAIL 1999] LABORATORIO DE APLICACIONES INDUSTRIALES DEL LÁSER; "*Manual de seguridad de la instalación del láser de CO<sub>2</sub> RS 2000SM*"; Universidad de la Coruña. (1999).

- [LASER FOCUS 2003] STEPHEN G. ANDERSON ; "Review and forecast of the laser markets"; Laser Focus World, USA (Vol. 39, issue 1&2).
- [LAURENS 1996] LAURENS, P. y otros; "Absorption dynamic behaviour of metals during CO<sub>2</sub> laser solid state treatments"; Rev. J. Phys. D: Appl. Phys. 29. (1996).
- [LÓPEZ 1999] LÓPEZ CARBALLEIRA, M.; "Desarrollo e instrumentación de un sistema de tratamiento térmico superficial de materiales metálicos con láser de potencia"; Proyecto Fin de Carrera, E.P.S. Ferrol. (1999).
- [MAGNUSSON 1994] MAGNUSSON, C.; *Technical report*; Lulea University of Technology, Suecia. (1994).
- [MARCO 1998] MARCO, A. L. y BELZUNCE, F. J.; "Estudio del endurecimiento superficial por láser de fundiciones grises"; Rev. Metal. Madrid. 34 (2). (1998).
- [MELANDER 1985] MELANDER, M., J. N.; "Heating and cooling transformation diagrams for the rapid heat treatment of two alloy steels"; American Society for Metals, Vol. 4, No. 1. (June 1985).
- [MIGLIORE 1996] MIGLIORE, L.; "Laser Materials Processing"; Ed. Leonard Migliore. (1996).
- [MOLPECERES 2002] MOLPECERES, C.; CATALINA, R. y OCAÑA, J.L.; "Control de procesos de temple con láser mediante dispositivos pirométricos"; Rev. Metal. n°38. pp. 195-204. (2002).
- [MORÍS 2001] MORÍS MENÉNDEZ-VALDÉS, G.; "Ingenios Hidráulicos Históricos: Molinos, Batanes y Ferrerías"; Colegio Oficial de Ingenieros Superiores Industriales de Asturias y León; Gijón. (2001).
- [MUÑOZ 2002] MUÑOZ FRÍAS, J. D.; "Control Avanzado de Máquinas de Inducción". Tesis Doctoral. Universidad Pontificia de Comillas. Madrid. (2002).
- [NIST 1995] NATIONAL INSTITUTE OF STANDARDS AND TECHNOLOGY; "Guide for the Use of the International System of Units (SI)". NIST Special Publication 811. (1995).
- [OLSEN 1988] OLSEN, F. O.; "Theoretical Investigations in the Fundamental Mechanics of High Intensity Laser Light Reflectivity"; SPIE Proc. Vol

- 1020; High Power CO<sub>2</sub> Laser Systems and Applications; pp. 114-122. (1988).
- [OCAÑA 1993] OCAÑA, J.L.; *Review of Mathematical Models of High Power Laser Material Processing*; EU-194 Working Group on Mathematical Modelling; Eds. Technische Universität Viena; Austria. (1993).
- [OCAÑA 1999] OCAÑA, J.L. et al.; *Applied Opt*; 38. pp. 4570-4576. (1999).
- [OGATA 1993] OGATA, K.; *"Ingeniería de control moderna"*; Prentice-Hall; México. (1999).
- [ORZA 1986] ORZA SEGADE, J.M.; *"Láseres"*; Consejo Superior de Investigaciones Científicas; Madrid. (1986).
- [ORZA 1998] ORZA SEGADE, J.M.; *"Una introducción a las aplicaciones industriales de los láseres. Aspectos económicos y nuevos desarrollos"*; Rev. Metal.; Madrid. 34 (2). (1998).
- [PIZZI 1987] PIZZI, P.; *"Laser Metalworking"*; Applied Laser Tooling; Ed. O.D.D. Soares y M. Pérez-Amor; pp. 213-233. (1987).
- [POPMA 1992] POPMA, J. A.; *"The Use of Models for the Determination of the Machining Parameters of Laser Hardening and Laser Cladding"*; Tesis Doctoral; Univ. Twente; Holanda. (1992).
- [PRASAD 1978] PRASAD, B. S. N. and MACARENHAS, R.; *A laboratory experiment on the application of Stefan's law to tungsten filament electric lamps*; Am. J. Phys. 46. (1978).
- [PROKHOROV 1990] PROKHOROV, A.M. y otros; *"Laser Heating of Metals"*; Adam Hilger. (1990).
- [RAMIL 2004] RAMIL, A.; ALVAREZ, C. et al.; *"Aplicación del análisis dimensional a la simulación de procesos de temple con láser: Elección de los parámetros del proceso y estimación de errores"*; Congreso Métodos Computacionais Em Engenharia; Libro de actas; ISBN: 972-49-2008-9 Mayo (2004).
- [RAMOUS 1992] RAMOUS, E.; *"Carburization of Steel Surfaces by Laser Treatment"*. (1992).

- [RAPPAZ 1991] RAPPAZ, M.; "*Les donnees Generales de la Simulation dans le Traitement Laser*"; Laser de Puissance et Traitements des Materiaux; Ecole de Printemps, Sirueil, Francia. (1991).
- [READY 1971] READY, J. F.; "*Effects of High Power Laser Radiation*"; Academic Press. (1971).
- [REITZ 1996] REITZ, MILFORD, CHRISTY; "*Fundamentos de la teoría electromagnética*"; Addison-Wesley Iberoamericana, S. A.; 4ª Edición; pp. 399-444. (1996).
- [REED 1999] REED, R. C. y otros; "*Laser transformation hardening of steel: effects of beam mode, beam size, and composition*"; Rev. Materials Science and Technology; Vol. 15. (January 1999).
- [RÖMER 1999] G.R.B.E. RÖMER; "*Modelling and control of laser surface treatment*"; Tesis doctoral; Universidad de Twente. (1999).
- [RUDLAFF 1990] RUDLAFF, T. y DAUSINGER, F.; "*Increasing the Efficiency of Laser Beam Hardening*"; Proc. ICALEO; pp. 451-458. (1990).
- [SAAVEDRA 2004] SAAVEDRA, E.; "*Simulación numérica de procesos de tratamiento térmico superficial de aceros con láser de potencia*"; Tesis doctoral; Universidade da Coruña.(2004).
- [SANTAMARÍA 1993] SANTAMARÍA, F. y SAN JOSÉ, I.; "*La tecnología de haz de electrones y sus aplicaciones*"; McGraw-Hill. Madrid. (1993).
- [SHACKELFORD 1992] SHACKELFORD, J. M.; "*Ciencia de Materiales para Ingenieros*"; Prentice Hall; México. (1992).
- [SHERCLIFF 1991] SHERCLIFF, H.R. ; ASHBY, M.F.; "*The prediction of Case Depth in Láser Transformation Hardening*"; Metallurgical Transactions A, 22A October; pp. 2459-2466. (1991).
- [SMITHELLS 1992] SMITHELLS, C.J.; "*Smithells metals reference book*" (7th ed); Ed. E.A. Brandes & G.B. Brooks; Oxford: Butterworth-Heinemann. (1992).
- [SONA 1987] SONA, A.; "*Metallic Materials Processing: Cutting and Drilling*"; Applied Laser Tooling; ed. O.D.D. Soares y M. Pérez-Amor; pp. 105-113. (1987).



- [STEEN 1987] STEEN, W. M.; *"Surface Engineering with Laser "*; Laser Tooling; ed. O.D.D. Soares y M. Pérez-Amor; pp. 131-181. (1987).
- [STERN 1979] STERN, J.; Rap. ISL 914. (1979).
- [TOULOUKIAN 1990] TOULOUKIAN, Y.S. y DEWIT, D.P.; *Thermophysical properties of matter*;TPRC Data Series. (1990).
- [VICTOR 1998] VICTOR, M. et al.; *"A computational model for the prediction of steel hardenability"*; Metallurgical and Materials Transactions B: Vol. 29B: pp. 661-672. (June 1998).
- [WAGNER 1991] WAGNER, W.S.; *Temperature and color of incandescent lamps*; Phys. Teacher. (March 1991).
- [WANG 2000] WANG, J-T., Hwang, C-C. ; *"The influence of temperature and surface conditions on surface absorptivity in laser surface treatment"*; Journal of Applied Physics; Vol. 87; No. 7; pp. 3245-3253. (2000).
- [YAÑEZ 2002] YAÑEZ, A.; ALVAREZ, J.C. y otros; *Modelling of temperature evolution on metals during laser hardening process"*; Rev. Applied Surface Science ; Vol. 186; pp. 611-616. (2002).
- [YAÑEZ 2003] YAÑEZ, A.; AMADO, J.M.; ALVAREZ, J.C. y otros; *"Modelling of the Surface Properties in Laser Heat Treatments"*; 7th International Conference on Trends in the development of Machinery and associated Technology (TMT 2003); Barcelona. (2003).
- [ZIEGLER 1942] ZIEGLER, J. G. ; NICHOLS, N. B. ; *"Optimum settings for automatic controllers"*; Transactions of the ASME; Vol. 64; n. 8. (1942).

## Apéndice A

# Equipos necesarios para el tratamiento térmico superficial de materiales metálicos con láser de potencia con control en tiempo real

Una vez desarrollada la metodología del tratamiento térmico superficial de materiales metálicos con láser de potencia, se describirán los equipos principales, instalaciones auxiliares e instrumentación que se necesitan para desarrollar el procesamiento.

Para la realización de los procesos de temple sobre probetas de acero se ha utilizado la instalación del láser de CO<sub>2</sub> RS 2000SM, del Laboratorio de Aplicaciones Industriales del Láser, situado en el Centro de Investigaciones Tecnológicas del Campus de Ferrol, de la Universidad de la Coruña. Dicha instalación cuenta con todos los equipos necesarios para realizar procesos de tratamiento térmico superficial de una pieza metálica y descritos a continuación.

Consta de un resonador láser y su armario de control, sistema de suministro de gases, una mesa para procesado y su armario eléctrico asociado, un refrigerador, un compresor de aire con filtro de aire comprimido y un secador frigorífico, un aspirador-filtro de los gases generados en el proceso, así como un ordenador para el diseño de recorridos y postprocesado. Además todos los necesarios para un sistema de control en tiempo real: pirómetro de radiación como sensor del proceso, tarjeta de adquisición entrada-salida, PC de control y analizador de haz.

### A.1 Resonador láser

Se trata de un resonador de gran potencia que permite suministrar una elevada densidad de energía sobre la superficie a tratar.

En el tratamiento térmico superficial de materiales metálicos se utilizan fundamentalmente resonadores de CO<sub>2</sub>, que suministran una gran potencia con un rendimiento

## **A. Equipos necesarios para el tratamiento térmico superficial de materiales metálicos con láser de potencia con control en tiempo real 213**

elevado. También se utilizan, aunque en menor medida, resonadores de Nd:YAG.

El modo de funcionamiento del láser en los tratamientos térmicos superficiales es en cualquier caso en modo continuo.

Las características mas importantes son:

- Generador láser de CO<sub>2</sub> de flujo axial rápido Rofin Sinar RS 2000 SM.
- La potencia de salida garantizada de este modelo es de 2000 W (potencia teórica), siendo la gama típica entre 200 W y 2200 W (potencia máxima) y la estabilidad de  $\pm 2$  %.
- El haz tiene una longitud de onda de 10,6 mm, 19 mm de diámetro a la salida del resonador, menos de 1,5 mrad de ángulo completo de divergencia y menos de  $\pm 0.10$  mrad de estabilidad de apunte. El modo transversal será el TEM01\* y la polarización será lineal por debajo de 45° hacia la horizontal.
- El modo de pulso utilizado es CW (continuous wave o régimen continuo).
- El sistema óptico está compuesto por un espejo polarizador  $\frac{\lambda}{4}$ , un espejo plano y una lente plano convexa.
- El espejo polarizador es de 2" de diámetro y 0,2" de espesor de cobre con recubrimiento de oro de 2 mm.
- El espejo plano es de 2" de diámetro y 0,2" de espesor de cobre con recubrimiento de oro de 2 mm.
- La lente plano convexa es de ZnSe, su diámetro es de 1,5", y tiene una longitud focal de 7,5". En geometrías cilíndricas, por problemas de distancia disponible entre cabezal giratorio y pieza para lograr una anchura determinada, también de uso otra lente de longitud focal 5".

### **A.2 Armario eléctrico del resonador**

Controla todo el funcionamiento del resonador: llenado y vaciado de la mezcla de gases, selección del modo de emisión (continuo o pulsado), nivel de potencia, control del obturador, control de todas las alarmas y parada de emergencia. También admite señales de control externas para seleccionar el nivel de potencia y modo de emisión entre los programados previamente, así como contactos para habilitar y deshabilitar el rayo y paradas de emergencia.

Las entradas para el control de potencia, através de la regleta X40 pueden ser digitales, por medio de 8+1 líneas de datos, con entradas mediante optoacopladores previstos para 24 V o mediante una señal analógica externa entre 0 V y 10 V, que permite variar la potencia desde el 0 % al 100 % de la nominal de forma lineal, que es la que se usa con el sistema de control en tiempo real.

### **A.3 Sistema de provisión de gases**

Para el funcionamiento del láser de  $CO_2$  es necesaria una instalación de gases que proporcione dióxido de carbono, nitrógeno y helio para el resonador. Si el proceso que se desea realizar es el tratamiento térmico superficial de temple, la instalación de gases permite la aportación de un gas inerte, como el nitrógeno, a través de la boquilla del cabezal láser, que cumplirá la doble función de protección de la lente y a al vez, evitar la oxidación de las piezas bajo tratamiento mientras están a alta temperatura.

Los equipos de regulación y control de gases son de la misma empresa que suministra las botellas de gases y garantizarán un eficiente control de los gases.

#### **A.3.1 Gases del resonador**

La mezcla de gases que necesita el resonador del láser de  $CO_2$  está compuesta por dióxido de carbono, nitrógeno y helio. El sistema de provisión de gases suministra los gases con un caudal y presión adecuados para el buen funcionamiento del mezclador incorporado a la máquina. Para adecuar la presión de las botellas de gas a la presión necesaria en la máquina se dispondrá de un sistema de dobles paneles reductores de presión, uno para ajuste grueso en alta presión y otro para ajuste fino.

Para el resonador se emplearán los siguientes gases:

- $N_2$ : Calidad C-50, suministro en botella, equipo IGE-10/IGE-25.
- $He$ : Calidad C-45 C-50, suministro en botella, equipo IGE-10/IGE-25.
- $CO_2$ : Calidad C-45, suministro en botella, equipo IGE-10/IGE-25.

#### **A.3.2 Gases de proceso**

Además de suministrar los gases para el funcionamiento del resonador, la instalación de gases proporciona al sistema de los gases de asistencia que sea necesario utilizar en función del proceso concreto que se desea realizar. Dichos gases se aportan al proceso a través del cabezal del láser. El acondicionamiento de la presión de los gases de asistencia para el proceso se realizará mediante paneles reductores de presión, al igual que en el caso de los gases del resonador. También se cuenta con un regulador de caudal.

La situación de las botellas de gases y sus correspondientes soportes es pegadas a la pared, donde las molestias que causan su presencia son las menores posibles.

Los gases de asistencia con los que contará la instalación serán los siguientes:

- $O_2$  seco: Calidad C-50, suministro en botella, equipo IGE-10/IGE-25.
- $N_2$  seco: Calidad C-45 C-50, suministro en botella, equipo IGE-10/IGE-25.
- $He$ : Calidad C-45, suministro en botella, equipo IGE-40/IGE-25.
- $Ar$ : Calidad C-45, suministro en botella, equipo IGE-40/IGE-25.

### **A.4 Mesa de coordenadas**

La mesa de coordenadas permite movimientos relativos entre haz y pieza para su procesamiento. El sistema de procesamiento incluye un sistema de guiado óptico del



## **A. Equipos necesarios para el tratamiento térmico superficial de materiales metálicos con láser de potencia con control en tiempo real 215**

rayo y cabezal. Este sistema dirige el haz al punto de trabajo mediante espejos. La lente situada en el cabezal focaliza el haz al tamaño adecuado a cada proceso.

Otra de las funciones que cumple el cabezal es el aporte de gases al proceso. Los elementos ópticos del sistema de guiado son fácilmente accesibles para su mantenimiento (limpieza y alineamiento) de forma simple y rápida.

Los sistemas de procesamiento con láser constan de una fuente de haz láser y una mesa de coordenadas gobernadas mediante control numérico o un robot. De esta forma el sistema proporciona el movimiento relativo entre el haz y la pieza necesario para realizar el proceso.

Existen tres posibilidades de movimiento relativo entre el haz y la pieza:

- Movimiento de la pieza en un eje permaneciendo el haz inmóvil.
- Movimiento del haz en otro eje permaneciendo inmóvil la pieza. Estos dos permiten trayectorias rectas.
- Movimiento tanto la pieza como del haz: movimiento combinado en dos direcciones para trayectorias curvas.
- Sistemas donde la pieza puede girar en cabezal giratorio situado sobre la mesa y movimiento de la mesa y del haz, como para hacer recorridos en hélice en las geometrías cilíndricas.

En los casos en los que existe movimiento del haz es posible tanto mover todo el cabezal del láser como mover un sistema óptico de entrega de haz, que consistiría en un conjunto de espejos deflectores.

La mesa de coordenadas, al igual que otros tipos de máquinas-herramienta, se programa por control numérico. El control numérico permite, además de gobernar el movimiento de la mesa de coordenadas, controlar las funciones del láser tales como el encendido, apagado y nivel de potencia.

Los recorridos son de 2000 mm en el eje "X", 1000 mm en el eje "Y", y 150 mm en el eje "Z". La velocidad de posicionado es de 20 m/min y la velocidad de procesamiento máximo de 10 m/min. Tiene posibilidad de controlar un cuarto eje de movimiento giratorio que posibilita el tratamiento de piezas circulares. El cabezal tiene una capacidad de hasta 160 mm de diámetro en piezas cortas y de 50 mm para piezas largas (diámetro interior libre del cabezal) y velocidades de giro entre 0 rpm y 22 rpm.

El control de la mesa está gobernado por un control numérico (CNC) Fagor 8050 de 32 bit, con autómatas integrados y el accionamiento es mediante servomotores de corriente alterna con variadores de frecuencia.

### **A.5 Armario eléctrico**

El armario eléctrico dispondrá de un cuadro eléctrico encargado de suministrar la alimentación eléctrica a todas las unidades: pupitre CNC, el procesador de control numérico y los controladores de los motores de los ejes del sistema de procesamiento, así como todos los equipos de protección y enclavamientos relacionados con el sistema de procesamiento.

Incorpora también algunas alarmas del resonador: alta temperatura del agua de refrigeración y baja presión en el circuito de refrigeración.

## **A. Equipos necesarios para el tratamiento térmico superficial de materiales metálicos con láser de potencia con control en tiempo real 216**

El armario eléctrico dispone de las protecciones adecuadas para la línea general y para cada uno de los aparatos con los que cuenta la instalación del láser. Cada unidad dispone de un interruptor automático magnetotérmico y un diferencial adecuado a su consumo. Los cables desde el cuadro eléctrico hasta las diferentes unidades van por canaletas metálicas.

### **A.6 Refrigerador**

El refrigerador es de la marca Cold Energy, modelo TAE 101. La potencia frigorífica de este refrigerador es de 39,50 kW, lo que garantiza que se cubren ampliamente las necesidades de refrigeración del cabezal láser, cabina de control y ópticas del sistema, que son de 20,15 kW. Este sobredimensionamiento asegura que en todo momento se podrán garantizar los valores preestablecidos de temperatura y presión en el resonador, lo que evita el bloqueo del equipo por el salto de la correspondiente alarma.

Este equipo mantiene el agua del circuito de refrigeración, tratada químicamente, entre los márgenes de temperatura establecidos por el fabricante del resonador para garantizar la estabilidad de la potencia láser. El circuito de refrigeración debe refrigerar el resonador láser, la cabina de control y el sistema óptico de guiado y enfocado.

Los requerimientos del refrigerador vienen determinados por la presión mínima que exige el resonador o cabezal láser a la salida. Si no se cumplen dichos requerimientos de presión el equipo se bloqueará al saltar la alarma que detecta una presión anormalmente baja en el circuito de refrigeración.

Dado que el circuito de refrigeración también refrigera las ópticas (espejos y lente de enfoque) hay que asegurarse que la temperatura de rocío es inferior al valor de temperatura ajustado en el refrigerador para evitar condensaciones en estos elementos ópticos que podrían provocar su deterioro cuando incida el haz láser sobre ellos.

El refrigerador expulsa el aire que enfría el agua del circuito hacia el exterior del local mediante los conductos de salida dimensionados en función del caudal utilizado.

### **A.7 Compresor de aire y deshumidificador**

El laboratorio en el que se encuentra el láser está equipado con una línea general de aire comprimido, que puede satisfacer las necesidades de aire comprimido del equipo láser. Sin embargo, resulta conveniente contar con un equipo independiente para que no se produzcan paradas del equipo láser por posibles problemas o caídas de presión en el servicio general de aire comprimido. Para cubrir esa eventualidad, se utiliza un compresor local de aire.

El compresor utilizado es un compresor alternativo insonorizado Ingersoll-Rand modelo ES200T. Se trata de un compresor de una etapa, con 2 cilindros y funciona a un régimen de 1200 r/min.. Su desplazamiento es de 215 L/min y la máxima presión de 10 bar.

Este aire, al igual que el de la red general del edificio se utiliza para el accionamiento del obturador de salida del resonador y para el presurizado del camino óptico desde el resonador hasta la lente de enfoque. Este presurizado evita la entrada de contaminación que podría depositarse en los espejos o en la lente que podría, a su vez,

## **A. Equipos necesarios para el tratamiento térmico superficial de materiales metálicos con láser de potencia con control en tiempo real 217**

provocar el deterioro o destrucción de las mismas al incidir el haz láser sobre partículas depositadas sobre su superficie.

Para evitar depositar residuos de polvo y otros contaminantes en estos elementos ópticos, se cuenta con un filtro de salida para el aire comprimido para la eliminación de partículas y aceite residual. Se usa un filtro Ingersoll-Rand modelo IRP-47. Dicho modelo garantiza la eliminación de partículas de hasta  $1\text{ }\mu\text{m}$  y el contenido máximo de aceite residual es de  $1\text{ }\mu\text{g/g}$  en peso. La capacidad del filtro es de 780 L/min.

Tras el filtro de aire comprimido está instalado un secador frigorífico que permite eliminar el vapor de agua presente en el aire comprimido. Se trata de un Ingersoll-Rand modelo TMS 4. Su capacidad al punto de rocío será de  $0.36\text{ m}^3/\text{min}$  para  $2\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $0.42\text{ m}^3/\text{min}$  para  $7\text{ }^\circ\text{C}$  y  $0.45\text{ m}^3/\text{min}$  para  $10\text{ }^\circ\text{C}$ .

La misión del deshumidificador es condensar la humedad enfriando el aire comprimido, para eliminar el vapor de agua que tenga. La entrada de agua con el aire comprimido que se suministra al equipo podría tener graves consecuencias al contaminar las lentes del cabezal y causar en ellas un daño permanente o una rotura.

El sistema de aire del edificio también tiene filtros y deshumidificadores de características similares a los aquí descritos para el compresor local.

### **A.8 Aspirador y filtro de gases**

Durante el procesamiento de materiales se pueden producir humos tóxicos y partículas volátiles que es necesario evacuar del local donde se encuentra el equipo láser. Por lo tanto se dispone de un sistema de extracción y filtrado de gases.

El sistema de evacuación de humos aspira en una zona próxima al cabezal de proceso para extraer los gases generados. Un filtro colector de polvo se encarga de depurar los gases lo máximo posible antes de devolverlos al exterior del local. Las partículas con un tamaño mayor que el tamaño de malla de las mangas filtrantes quedarán depositadas en las superficies exteriores de la tela del filtro.

El aspirador de gases con filtro colector de polvo aspirará los humos y partículas que produce el procesamiento con láser. Se empleará el modelo FV-252 de la firma Construcciones Metálicas Santa Lucía S.A.. La potencia de este aspirador de gases es de 2,24 kW, y el tamaño de malla del filtro es de  $10\text{ }\mu\text{m}$ .

### **A.9 PC de diseño y posprocesado**

Lleva el ordenador de diseño y postprocesado de programa. En este ordenador está instalado un programa de CAD, con un módulo que procesa el dibujo añadiendo las entradas y salidas para cada trayecto a realizar, hacer reparto y optimización de una chapa si son varias las piezas a trabajar y posterior traslado al lenguaje CNC. También se pueden añadir selección de potencia del láser, órdenes de encendido y apagado del mismo, habilitación de gas de proceso al cabezal, etc.

El empleo de la tecnología CAD/CAM, consistente en la unificación del diseño asistido por ordenador y la fabricación asistida por ordenador, permite aumentar la productividad y eficacia de los equipos láser. Se han desarrollado numerosos programas para equipos de trabajo basados en la tecnología láser.



## A. Equipos necesarios para el tratamiento térmico superficial de materiales metálicos con láser de potencia con control en tiempo real 218

Un programa base para aplicaciones láser tiene cuatro componentes principales, todos con una referencia común: input, output, técnica de posicionamiento y láser.

El componente input genera una base de datos CAD a partir de la información exterior. La obtención de piezas optimizadas para el procesamiento láser es una realidad asequible en tiempo y costes para cualquier industria.

El sistema de output consiste en un postprocesador que actuará como nexo entre los códigos generados por el programa de CAD y el lenguaje de trabajo de la parte CAM.

La mayoría de las técnicas de posicionamiento del haz láser incluyen mesas de coordenadas, robots o sistemas galvanométricos de espejos deflectores. Su estructura de comandos puede utilizar información de un postprocesador para coordinar y sincronizar los movimientos de la herramienta láser.

El componente láser proporciona flexibilidad, versatilidad y seguridad para la fabricación.

### A.10 Pirómetro de radiación

El pirómetro utilizado es el modelo 7000EH-2 de E<sup>2</sup>Technology Corporation, modificado para obtener un periodo de muestreo de 10 ms y que opera en el rango de temperatura comprendido entre 723 K y 2123 K (450 °C y 1850 °C), con lo que cubre el rango exigido en la hoja 119 ofreciendo además la posibilidad de aplicar este sistema a otros tipos de tratamientos superficiales<sup>1</sup> y presentando una precisión mayor del 1 %. Si la temperatura de la superficie queda fuera de dicho rango la señal emitida es aún dependiente de la temperatura pero el fabricante ya no asegura una respuesta lineal.

El dispositivo tiene un sensor que opera en el rango de longitudes de onda comprendido entre 2  $\mu\text{m}$  y 2.5  $\mu\text{m}$  (alejado de la longitud de onda fundamental del láser de CO<sub>2</sub>) y, con la óptica instalada (650 mm de distancia focal), el área de medida es un círculo de 1.5 mm de diámetro. Se puede ajustar la emisividad de la superficie entre 0 y 0,99 en saltos de 0,01.

Tanto la cabeza de medición como la electrónica asociada está protegida de campos electromagnéticos mediante una carcasa de aluminio conectada a masa que la hace totalmente válida para trabajar en las cercanías de inductores, electrodos y demás generadores de campos, sin peligro de que afecten a las medidas.

La señal del detector, cuyo rango se extiende desde 450 mV hasta 1850 mV, está conectada a un sistema de lectura que consiste en una tarjeta de adquisición conectada a un PC. También dispone de salida en lazo de corriente autoalimentado de 4 mA a 20 mA, correspondiendo a las temperaturas 450 °C y 1850 °C respectivamente, siendo la escala lineal entre esos valores.

Debido a la evolución de la temperatura en la superficie de la pieza al moverse por debajo del haz láser, el punto más caliente está situado por detrás del centro del haz a una distancia que depende de la anchura del haz utilizado -dependiente de la distancia de la superficie al punto focal y de la lente utilizada- y de la velocidad relativa haz láser-probeta. También varía con la distribución transversal de la radiación láser,

<sup>1</sup>Recubrimientos, aleaciones superficiales, refusión, etc.



## **A. Equipos necesarios para el tratamiento térmico superficial de materiales metálicos con láser de potencia con control en tiempo real 219**

como ya se vió en capítulos anteriores. Todo ello hace necesario apuntar el pirómetro a un punto muy concreto.

Para ello el equipo dispone de una mirilla, que con la ayuda de un círculo de puntería permite alinear el pirómetro al punto deseado de la superficie de la pieza a tratar. Para ajustar la posición del pirómetro al punto donde se desea medir la temperatura, se monta sobre un dispositivo (descrito en la hoja 120 y siguientes) que permite el movimiento de la carcasa del pirómetro en tres ejes de forma manual sin necesidad de llaves mecánicas, lo que facilita el trabajo experimental en diferentes condiciones del proceso.

Pero una vez que el pirómetro está montado en el soporte que permite moverlo fácilmente a voluntad, esta mirilla está inalcanzable tal y como se comentó en la hoja 121, por lo que se diseñó un sistema auxiliar específico que permitiese esta tarea.

Para saber en todo momento hacia qué punto está dirigido el pirómetro, se preparó un dispositivo de puntería que fué objeto de una patente,<sup>2</sup> con el que se facilita situar el pirómetro en el punto que interesa.

Concluimos por tanto que este pirómetro, con el soporte adaptado y el dispositivo de puntería, cumple con las características exigidas en la hoja 119.

### **A.11 Tarjeta de adquisición**

La tarjeta utilizada para la toma de datos es la PCI-MIO-16E-4 de National Instruments. Sus principales características son las siguientes:

- 16 entradas analógicas simples u 8 diferenciales (seleccionables mediante software)
- Resolution 12 bits
- Rango entrada: bipolar  $\pm 5$  V; unipolar 0 V a 10 V
- Velocidad de muestreo máximo (un solo canal): 500 kS
- Error de pre-ganancia después de calibración:  $\pm 16 \mu\text{V}$  máximo
- Error de post-ganancia después de calibración:  $\pm 0.8 \text{ mV}$  máximo
- Características dinámicas: ancho de banda 350 kHz; tiempo subida a escalón a fondo escala  $4 \mu\text{s}$  máximo
- 2 salidas analógicas. Resolución 12 bits. Rango:  $\pm 10$  V ó 0 V a 10 V (seleccionable), con rampa de subida máxima de  $20 \text{ V} / \mu\text{s}$ ; ruido<sub>RMS</sub>  $200 \mu\text{V}$ .
- 8 entradas/salidas digitales compatibles TTL/CMOS. Entradas 0 V a 0.8 V o de 2 V a 5.0 V; salidas de 0.4 V a 4.35 V
- 2 canales contadores Up/Down. Compatible TTL/CMOS. Frecuencia máxima 20 MHz.

---

<sup>2</sup>Patente con n° de solicitud P200101029 y fecha de prioridad 23-04-2001

## **A. Equipos necesarios para el tratamiento térmico superficial de materiales metálicos con láser de potencia con control en tiempo real 220**

Aunque la capacidad de muestreo la tarjeta instalada es de  $5 \times 10^5$  registros por segundo, como el periodo de muestreo del pirómetro es de 10 ms, el de la tarjeta se limita a 20 ms ya que así está asegurado que cada vez que adquiere la tarjeta, el pirómetro ha refrescado su medida. Si posteriormente se decide un periodo de muestreo inferior, la tarjeta leerá varias veces la misma lectura del pirómetro hasta que ésta se actualice.

### **A.12 PC de control**

En él está instalada la tarjeta de adquisición y el entorno LabVIEW<sup>®</sup> de programación. Con este programa se realizó el regulador PID que se utilizó en este trabajo de tesis, cuyas características de diseño y funcionamiento se describieron en el capítulo 5.

El ordenador está basado en un Pentium III<sup>®</sup> a 1.4 GHz, cuyas prestaciones son mas que suficientes para la aplicación aquí utilizada.

### **A.13 Analizador de haz**

Este equipo nos permite caracterizar completamente la distribución real del haz láser así como realizar medidas para determinar la anchura del haz, dado que es un parámetro muy importante a la hora de realizar contrastes entre experimentos y cálculos realizados con los modelos.

El equipo es el modelo ASTRE desarrollado por la Societé Européenne de Systèmes Optiques. Consta de un cabezal sensor y un ordenador personal con una tarjeta de adquisición de datos y el programa de cálculo y tratamiento posterior.

La cabeza sensora dispone de un dispositivo -light trap- que evita reflexiones del haz hacia el exterior. Este dispositivo está refrigerado por agua y se puede desmontar para realizar tareas de alineación con el equipo láser a analizar.

Las características generales son:

- ancho de banda : 0,5  $\mu\text{m}$  a 20  $\mu\text{m}$
- ancho de campo de medida : 5 mm  $\times$  5 mm
- resolución espacial : 80  $\mu\text{m}$   $\times$  80  $\mu\text{m}$
- resolución en niveles de energía : 256 niveles de grises
- velocidad de barrido : 25 imágenes por segundo
- Modos de operación : registro continuo o instantáneas
- potencia máxima media : 5 kW (1 kW en láseres pulsados)
- densidad de potencia máxima : 1 MW/cm<sup>2</sup> (200 kW/cm<sup>2</sup> en láseres pulsados)

El equipo dispone de contactos para bloquear la emisión láser en ausencia de la alimentación eléctrica a la cabeza sensora (que implicaría la parada mecánica del troceador del haz y su consiguiente destrucción) o si la presión del aire de refrigeración

**A. Equipos necesarios para el tratamiento térmico superficial de  
materiales metálicos con láser de potencia con control en tiempo real 221**

de la electrónica interna es inferior a un determinado valor. No tiene control sobre la ausencia de flujo de agua por el *light trap* por lo que se debe tener siempre conectado cuando se está trabajando con él. La mejor opción es conectarlo en serie con la refrigeración de la lente de enfoque del láser para no olvidarse.

## **Apéndice B**

# **Condiciones de los procesos y equipos para análisis de resultados**

### **B.1 Generalidades**

Para poder llevar a cabo la ejecución de la parte experimental de la tesis, implica el uso de los equipos descritos en el apéndice A y para la preparación y análisis de los resultados obtenidos son necesarios otros elementos que se describen en este apéndice.

La preparación metalográfica de las probetas de acero templadas se ha realizado en el laboratorio con el que cuenta el Laboratorio de Aplicaciones Industriales del Láser en la Escuela Politécnica Superior de Ferrol. Con el equipo disponible en este laboratorio es posible cortar, embutir, pulir y atacar las probetas de acero, dejándolas en condiciones adecuadas para su posterior análisis. Además se cuenta con un microdurómetro para realizar mediciones de la dureza obtenida en las probetas tratadas y poder comparar con los datos obtenidos de la simulación.

El estudio metalográfico de las probetas se ha realizado en los Laboratorios Centrales de Apoyo a la Investigación de la Universidad de la Coruña, situados en el Campus de la Zapateira. Se ha empleado un fotomicroscopio óptico donde se han tomado fotografías ampliadas de las probetas tratadas, para su posterior estudio.

Durante todo el tiempo de trabajo en el laboratorio, y especialmente durante el tiempo de procesamiento de las probetas, se tomarán las medidas de seguridad previstas en el Manual de Seguridad [LAIL 1999].

#### **B.1.1 Condiciones de los procesos**

La distribución de intensidad transversal del haz corresponde a un modo de simetría circular TEM<sub>01</sub>\* para 1500 W de potencia continua. La figura B.1 muestra la forma de esta distribución de intensidad para el sistema láser utilizado, obtenida experimentalmente mediante el analizador de haz descrito en el anexo A.

En el laboratorio se ha medido una temperatura ambiental entre 20 °C y 25 °C en el momento de realizar los procesos.



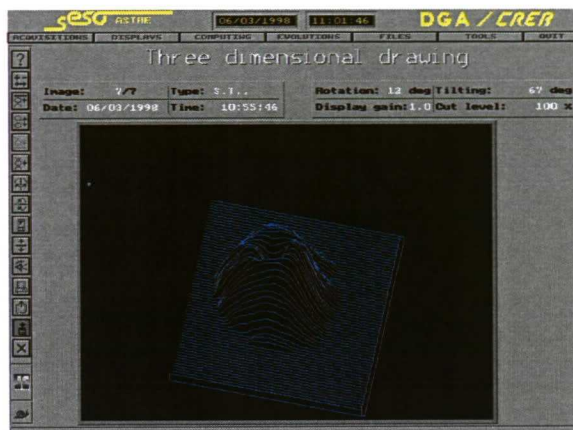


Figura B.1: *Distribución real de la intensidad del haz láser TEM01\*.*

Como gas de protección del sistema óptico se ha empleado nitrógeno a una presión de  $1 \text{ kg cm}^{-2}$ , con un caudal de  $5 \text{ Lmin}^{-1}$ . Este gas circula en la dirección del haz láser e incide perpendicularmente a la superficie de la pieza.

Las probetas de acero utilizadas han sido de diferentes geometrías y materiales. En diferentes fases del trabajo de tesis se han utilizado probetas obtenidas a partir de un de A420 y F114 que han sido cortadas y torneadas con un diámetro de 44 mm y un espesor de 6 mm. En fases posteriores se han utilizado probetas rectangulares, obtenidas a partir de un perfil de sección rectangular de  $57 \text{ mm} \times 40 \text{ mm}$  y cortando diferentes espesores. Finalmente, también se realizaron pruebas en piezas con geometría cilíndrica para ver como respondía el sistema al efecto del solapamiento de vueltas sucesivas.

Todas las probetas utilizadas han sido recubiertas con una capa de pintura negra mate para aumentar la absorción de la pieza durante el proceso.



Figura B.2: *Probeta F114 redonda con recubrimiento absorbente.*

En la figura B.2 se muestra una fotografía de la probeta de acero F114 con revestimiento absorbente preparada para ser procesada.

El haz, que incide sobre la probeta perpendicularmente al plano de la superficie de la misma, realiza un recorrido sobre la superficie de la probeta en una zona lo suficientemente alejada de los extremos para que la consideración de que el medio es semiinfinito sea válida.

### **B.1.2 Parámetros de los procesos**

Se han considerado variables de los procesos la potencia del láser, el tamaño del haz y la velocidad de procesado. Se han realizado numerosos procesos con diferentes combinaciones de los valores de los parámetros que se han considerado variables.

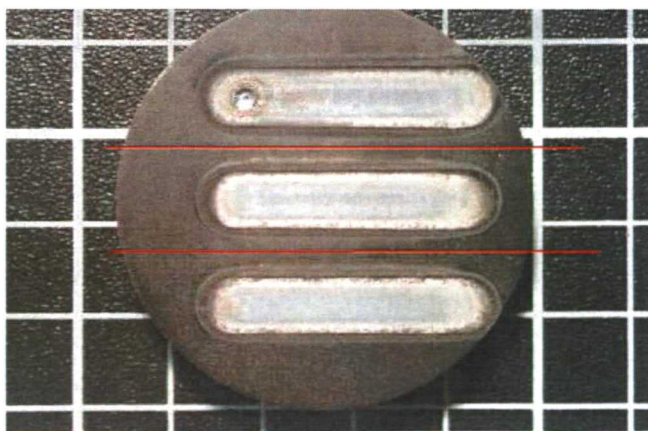
Las potencias que se han utilizado se encuentran en el rango de 500 W a 2200 W. El diámetro característico del haz ha variado en los procesos seleccionados entre los 2.5 mm y los 7 mm. Las velocidades finales consideradas son de  $10 \text{ mm s}^{-1}$ , por ser unos valores adecuados para el proceso de temple de los materiales estudiados.

Hay que destacar que mientras los valores de potencia y velocidad se programan en el pupitre del CNC, el diámetro del haz debe de ser medido según se describió en la página 154 y siguientes.

## **B.2 Preparación y estudio de las probetas de acero templadas**

### **B.2.1 Preparación metalográfica de las probetas templadas**

Una vez realizados los procesos de temple superficial de las probetas de acero A420 y F114 según las condiciones estudiadas y con los parámetros seleccionados, se realiza una preparación metalográfica adecuada de las probetas para que puedan ser estudiados los resultados de los procesos.



*Figura B.3: Probeta tratada indicando líneas de corte.*

En primer lugar se corta la probeta en secciones para separar las zonas tratadas con distintos parámetros. Puesto que este corte se realizará entre las zonas tratadas de las probetas y a una cierta distancia de estas (ver figura B.3), se puede utilizar una sierra de metal sin que resulten afectadas las zonas del material tratadas.

Una vez obtenidas las probetas individuales para cada tratamiento térmico realizado, se procede al corte transversal de la probeta. Este corte transversal se realiza aproximadamente en el punto medio de la longitud tratada, donde se supone que se han alcanzado las condiciones de procesamiento en régimen permanente. El corte transversal se realiza directamente sobre la zona de la probeta procesada, por lo que se utiliza una cortadora radial semiautomática refrigerada por líquido (descrita en otro apartado de este Apéndice B), manteniendo el disco de corte en contacto continuo con un medio lubricante líquido. Este procedimiento garantiza unos esfuerzos de corte muy pequeños y una disipación de calor adecuada para no variar las propiedades metálicas que la zona procesada ha alcanzado con el temple.

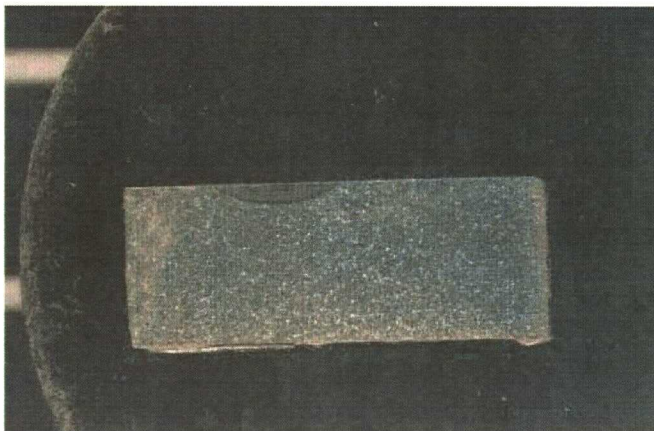


Figura B.4: *Probeta cortada y embutida.*

Tras el corte transversal de la probeta se procede al embutido de la misma, para facilitar su manipulación durante el pulido y el posterior análisis metalográfico. El embutido se realiza con la aplicación de resina en una embutidora automática, que mediante el calentamiento, prensado y enfriamiento de la resina sobre la probeta permite obtener un bloque cilíndrico de resina endurecida, en la parte superior del cual se encuentra la superficie transversal de la zona tratada de la probeta. En la figura B.4 se muestra una probeta preparada para el análisis metalográfico.

El pulido consiste en la eliminación de los defectos y ralladuras de la superficie transversal de la zona de la probeta tratada. Esto se logra sometiendo la superficie a pulir al efecto de diferentes discos abrasivos, comenzando por la utilización de discos con abrasivos de grano grueso para eliminar defectos superficiales gruesos, y disminuyendo progresivamente el tamaño de grano de los discos para obtener superficies lo más perfectas posibles, para acabar el pulido con paños a los que se añade polvo en



spray de diferente tamaño de grano. El proceso de pulido se realiza en una pulidora (descrita en este Apéndice B) que cuenta con un plato giratorio en el que se sitúan los discos de pulido y un cabezal portaprobetas giratorio que hace rotar las probetas sobre el disco de pulido, logrando que el pulido tenga lugar en diferentes direcciones sobre la superficie de la probeta. Este aspecto es fundamental para no obtener una superficie con un rallado fino en una dirección determinada.

Una vez que se ha obtenido una superficie exenta de imperfecciones, se procede al ataque de la misma mediante un reactivo adecuado que permita observar las diferentes estructuras metalográficas obtenidas al templear el material. En el caso del acero F114 templado se utiliza nital, que permite observar los límites de las zonas con diferentes estructuras e incluso apreciar la forma de los granos obtenidos, como las agujas de martensita.

### B.2.2 Análisis metalográfico de las probetas templadas

El análisis metalográfico de las probetas templadas consiste en la observación de las diferentes estructuras metalográficas obtenidas en la zona de la superficie de la probeta para delimitar la zona endurecida, y en la realización de ensayos de microdureza para evaluar el efecto real del tratamiento de temple sobre la dureza del material.

Para el estudio de los límites de la zona transformada y de las estructuras metalográficas que se obtienen, se debe contar con un fotomicroscopio metalográfico que permita observar la probeta con objetivos de 5, 20 y 50 aumentos. En la figura B.5 se muestra una fotografía de la zona tratada con parámetros:  $P=800\text{ W}$ ,  $v=10\text{ mm s}^{-1}$  y anchura del haz 7 mm. En la figura B.5 se muestra con mayor ampliación parte de la zona tratada pudiendo apreciar las estructuras obtenidas. El fotomicroscopio

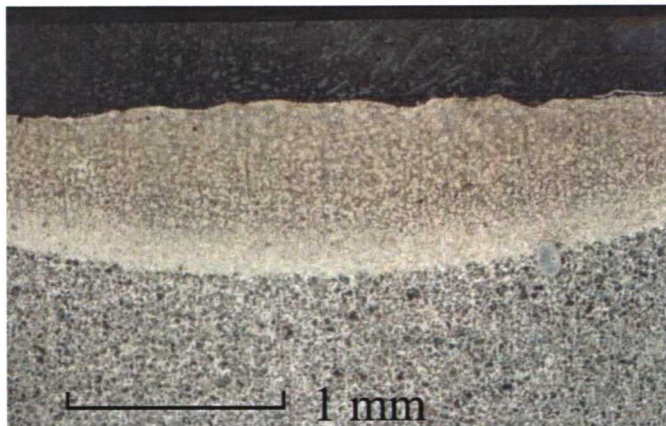


Figura B.5: Foto de la zona tratada al microscopio (Zoom  $\times 5$ ).

óptico deberá de incorporar una cámara fotográfica que permita fotografiar la zona a estudiar con los aumentos seleccionados. Las fotografías obtenidas permitirán tomar



medidas de las dimensiones de la zona templada, pues, conociendo los aumentos del objetivo y el tamaño de la fotografía respecto al film, es posible conocer la escala de las fotografías. Las fotografías realizadas con lentes de mayor aumento permitirán

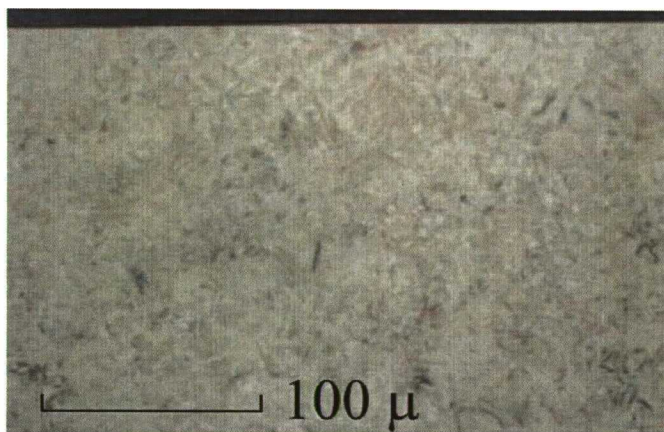


Figura B.6: *Microestructura martensítica de la zona templada (Zoom  $\times 50$ ).*

observar las características de los granos de la microestructura, con lo que se puede caracterizar la microestructura del acero.

Utilizando los micrómetros acoplados a la mesa portamuestras del microdurómetro a la vez que se está visualizando la imagen a través de la cámara acoplada al microdurómetro para apreciar las diferentes estructuras metalográficas, podemos medir el ancho y profundidad total de la zona tratada.

La última fase del análisis metalográfico de las probetas tratadas térmicamente consiste en la medición de la dureza en la zona transformada y su comparación con la dureza del material base. Para ello se utiliza un microdurómetro, que permite medir la microdureza en el lugar de la probeta seleccionado mediante la óptica y cámara digital que incorpora.

### B.3 Equipo de preparación metalográfica

El equipo de preparación metalográfica estará compuesto por una cortadora, una embutidora de probetas y una pulidora automática.

#### B.3.1 Cortadora

La cortadora será una cortadora manual modelo Labotom-3 de la marca Struers. El motor tiene una potencia de 3 kW y una capacidad de corte de 90 mm de diámetro. La velocidad de la cortadora radial será de 2845 r/min. Tiene refrigeración líquida a base de emulsión de aceite en agua que se hace circular con una pequeña bomba

así como manguera para la limpieza interior. Tiene una mesa con canales en T que permiten montar soportes de sujeción universales. También dispone de un juego de soportes para mantener las piezas a cortar firmemente sujetas en varias configuraciones geométricas (piezas planas y cilíndricas).

Es de destacar la importancia que tiene que durante la fase de corte no se produzcan calentamientos que podrían provocar alteraciones en las microestructuras de las probetas [ASM 1995] por lo que siempre se deberá realizar con buena refrigeración y con una presión baja en el disco de corte. Una buena referencia visual es que no salgan chispas de la zona de corte.

### B.3.2 Embutidora de probetas

La embutidora de probetas será automática modelo Labopress-3 también de la marca Struers. El embutido es automático una vez fijados los parámetros de tiempo, presión y temperatura. El equipo mantiene automáticamente el valor de la presión compensando la disminución del volumen que tiene lugar con la polimerización de la resina. El mantenimiento de la temperatura y posterior refrigeración de la probeta se realiza por agua en circuito abierto.

### Procedimiento

Una vez cortada la probeta a las medidas adecuadas se procederá a su embutido, mediante la aplicación de las correspondientes resinas en la embutidora en caliente. En la zona que se analizará de la probeta se utilizará resina Durofast de alta calidad, mientras que para el relleno se utilizará resina Multifast Green, de menor calidad. La embutidora se programará para una fuerza de 20 kN, un tiempo de calentamiento de 7 min, y un tiempo de enfriamiento 3 min.

### B.3.3 Pulidora

La pulidora será la automática Struers Labopol-1

### Ejecución de la preparación metalográfica

Se realizará de forma que permita analizar la microestructura resultante en el metal procesado sin ocasionar modificaciones ni perturbaciones en la zona tratada.

La probeta embutida se colocará en la pulidora, y se someterá al pulido junto con otras dos probetas embutidas para equilibrar el brazo y la presión sobre la probeta. El pulido se divide en cinco fases en función de la abrasividad a la que se somete la probeta, que irá decreciendo escalonadamente. Para ello se utilizarán distintos discos abrasivos:

- 1) Papel lija SIC paper, grit 220.
- 2) Paño MD-Allegro con adición de spray de 6 micras de tamaño grano.
- 3) Disco MD-DAC con adición de spray de 6 micras de tamaño de grano.
- 4) Disco MD-DAC con adición de spray de 3 micras de tamaño de grano.
- 5) Disco MD-MOL con adición de spray de 1 micra de tamaño de grano.

Cada uno de las fases de pulido se desarrollará durante 3 min, excepto en el pulido con papel lija, en el que se invertirá todo el tiempo necesario hasta conseguir una superficie plana. La fuerza que se aplicará a cada probeta embutida sobre el disco será de 20N.

Conviene destacar aquí la importancia que puede tener en la fase de lijado el uso de lijas nuevas en vez de gastadas, ya que puede variar la concentración sobre el contenido superficial de austenita retenida en la probeta de un 7.8 % a un 5.7 % [ASM 1995], con lo que puede afectar a las posteriores medidas de dureza.

## B.4 Equipo de análisis metalográfico

Para la realización del análisis metalográfico se contará con un microscopio óptico y con un microdurómetro.

### B.4.1 Fotomicroscopio metalográfico

El fotomicroscopio metalográfico es el modelo BX60M de la casa Olympus. Incorpora un equipo de microfotografía. Los mandos de enfoque macro-micro coaxiales tienen una graduación de 1 mm y el recorrido es de 25 mm. Está dotado de un iluminador de campo claro con luz incidente, y la lámpara es halógena de 100 W. La torreta porta-objetivos es de sistema revólver con capacidad para 6 objetivos. La platina dispone de mandos de desplazamiento ortogonales de  $X = 52$  mm e  $Y = 76$  mm. El tubo de observación binocular está inclinado  $60^\circ$  y la distancia interpupilar está entre 50 mm y 76 mm. Incorpora foto-tubo recto que permite acoplar el equipo de fotografía. La óptica incluye objetivos de 5x, 10x, 20x y 50x, un par de oculares de 10x de gran campo, un filtro verde, dos lámparas y un cable de conexión.

### B.4.2 Microdurómetro

Es el Shimadzu HMV-2 Series. Permite realizar mediciones de piezas pequeñas, capas superficiales sobre una base de diferente material y recubrimientos de pequeño espesor.

Dispone de mesa de traslación de la probeta dotadas de tornillos micrométricos con indicador digital en dos ejes XY, con una resolución de 0.01 mm. Tiene una cámara digital que permite ver la imagen en un monitor acoplado a un ordenador con un programa que permite seleccionar la carga (entre 98 mN y 19.69 mN) y el tiempo aplicados. También dispone de ocular con visor alternativo para tomar las medidas de la huella de forma manual.

Tiene un objetivo de 40x y el identador montado sobre la misma torreta, de modo que solo hay que girar la torreta para tener el identador en posición de medida. Una vez situado, el microdurómetro realiza el desplazamiento del identador y la aplicación de la carga durante el tiempo seleccionado. Una vez terminado, levanta el identador para permitir girar la torreta para efectuar la acotación de la huella sobre la misma pantalla del ordenador, situando las líneas para la medida. Una vez marcados los vértices de la huella, calcula la dureza de modo automático.



### B.4.3 Ejecución del análisis metalográfico

Para el análisis metalográfico de las probetas de acero templado se tomarán fotografías de la zona templada con el fotomicroscopio metalográfico. Se enfocará la zona templada de las probetas con los objetivos 5x, 20x y 50x, y se realizarán fotografías para cada probeta. Con el objetivo 5x se realizarán las fotografías generales de la zona tratada, para poder medir posteriormente las dimensiones de la zona templada. Las zonas de transición de temple se enfocarán con el objetivo 20x, para poder observar la variación de la microestructura del material. Con el objetivo 50x se enfocará la zona templada, con lo que se podrá analizar la microestructura obtenida.

La medición de la profundidad de temple se realizará midiendo las zonas templadas sobre las fotografías. Para obtener la profundidad de temple de la probeta se multiplicará la distancia medida sobre la fotografía por el coeficiente reductor correspondiente según el tamaño de la fotografía, el tamaño de la película y el objetivo seleccionado.

La microdureza se medirá con un microdurómetro. Se situará la probeta sobre la platina y con el objetivo M 40x se seleccionará la zona donde se medirá la microdureza. Luego se aplicará la carga con el penetrador. Al retirarse el penetrador se medirá la huella con el objetivo M 40x y el programa nos dará el valor de la microdureza.



## Apéndice C

# Programa PLC modificado

NOTA: En letra mas grande y negrita se señalan las modificaciones efectuadas en el programa para incluir el control externo de potencia mediante señal analógica.

%,MX, Incluye límite potencia al 99,2% y puesta a cero al parar el CNC

; Incluye también modificación para cerrar obturador al acabar CNC

; PLC maquina laser FERROL. Diciembre 2000

;

; GENERAL SOBRE EL PLC DEL 8050

; Entradas I 1/256

; Salidas O 1/256

; Marcas usuario M 1/2000

; M. flag aritmetico M 2003

; M. de relojes M 2009/2024

; M. estado fijo M 2046/2047

; M. mensajes M 4000/4127

; M. errores M 4500/4563

; M. pantallas M 4700/4955

; M. comuni CNC M 5000/5957

; Tempos T 1/256

; Contadores C 1/256

; Registros usuario R 1/256

; R. comuni CNC R 500/559

;

; DEFINICION DE ENTRADAS

DEF EMERIN M1801

DEF MICROX M1802

DEF MICROY M1803

DEF MICROZ M1804

DEF MICROW M1805

DEF LISTOX M1806

DEF LISTOY M1807

DEF LISTOZ M1808

### C. Programa PLC modificado

232

```

DEF LISTOW M1809
DEF GAS2 M1810 ; PUPITRE
;DEF M1811 ; //
DEF GAS1 M1812 ; //
DEF MARCHA M1813 ; //
DEF PARADA M1814 ; //
DEF SEG>UP M1815 ; //
DEF SEG>DW M1816 ; //
DEF ENA>RAYO M1817 ; SELECTOR EN RAYO, PROTECCION ENCLAVADA Y
VENTANA CERRADA
DEF V24ENT M1818
DEF V24SAL M1819
DEF TERMICOS M1820
DEF CURSOS M1821
DEF SETAS M1822
DEF AIRECP M1823
DEF PUERTAS M1824
DEF MANDO>ON M1825
DEF FUENTE M1826
;DEF I27 M1827
;DEF I28 M1828
;DEF I29 M1829
DEF HV>ON M1830
DEF SHUT>CL M1831
DEF SHUT>OP M1832
;DEF I35 M1835
;DEF I36 M1836
;DEF I37 M1837
;DEF I38 M1838
;DEF I39 M1839
;DEF I40 M1840
;
;DEFINICION DE SALIDAS, LA ALIM DE 24 VOLTIOS TIENE QUE
;SER L9 DEBIDO A EMERG(O1), PERO OJO QUE NO CAE CON EL MANDO!!!
DEF EMEROUT O1
DEF OP>SHUT O2 ; CABLEAR, PERO NO CONECTAR
;DEF O03 O3
DEF OFF>HV O4
DEF ON>RAYO O5
DEF EXTPOWER O6
DEF LEVEL1 O7
DEF LEVEL2 O8
DEF PULSE1 O9
DEF PULSE2 O10
DEF PULSE4 O11

```

### C. Programa PLC modificado

233

---

```

DEF    PULSE8      O12
DEF    LEVEL4      O13
DEF    REGUZ       O16
DEF    REGUXY      O17
DEF    REGUW       O18
DEF    RESETREG    O19
DEF    GAS3        O20
DEF    ANOMALIA    O21
DEF    RAYOSIGN    O22
DEF    ON>GAS2     O23
DEF    ON>GAS1     O24
;
; DEFINICION DE MARCAS PRINCIPALES
DEF    M>INIT      M100 ; M101,
DEF    M>RAYO      M200
DEF    M>RAYO1     M201
DEF    M>GAS       M300
DEF    M>GAS1      M301
DEF    M>GAS2      M302
DEF    M>GASCNC    M303
DEF    M>M1        M400
DEF    MDIVISOR    M450
DEF    M>SEG       M500
DEF    M>SEG1      M501
DEF    M>SEG2      M502
DEF    M>SEG3      M503
DEF    M>SEG4      M504
DEF    M>SEG5      M505
DEF    M>SEG6      M506
DEF    M>STOP      M600
DEF    M>START     M650
DEF    M>EMER      M700
DEF    M>DISABL    M800
DEF    M>POWER     M900
DEF    M>POWER1    M901
DEF    M>POWER2    M902
DEF    M>POWER3    M903
DEF    M>POWER4    M904
DEF    M>POWER5    M905
DEF    M>PWREXTCONT M906
DEF    M>NIVEL     M950
DEF    M>RAYOACTIVO M1000
;
; DEFINICIONES VALORES M CNC
DEF    ACT>RAYO    $80

```

### C. Programa PLC modificado

234

---

DEF	DES>RAYO	\$81
DEF	ACT>GAS3	\$82
DEF	DES>GAS3	\$83
DEF	ACT>GAS1	\$84
DEF	ACT>GAS2	\$85
DEF	DES>GAS	\$86
DEF	EN>RYG	\$87
DEF	DIS>RYG	\$88
DEF	DIVISOR	\$94
DEF	EN>PORT	\$96
DEF	ACT>SEG	\$97
DEF	ACT>SEGP	\$98
DEF	DES>SEG	\$99
DEF	PULSADO	\$100 ; DE 100 A 115
DEF	NIVEL	\$120 ; DE 120 A 125

;

; DEFINICION DE MENSAJES

DEF	MS>V24E	M4002 ; FALTA TENSION 24V ENTRADAS
DEF	MS>V24S	M4004 ; FALTA TENSION 24V SALIDAS
DEF	MS>AIRE	M4006 ; FALTA ENTRADA DE AIRE COMP.
DEF	MS>ALIM	M4008 ; PROBLEMA CON FUENTE REGULADORES
DEF	MS>TERM	M4010 ; ALGUN TERMICO X, Y, Z, W
DEF	MS>CURSOS	M4012 ; FIN DE CURSO X, Y, Z, W
DEF	MS>SETAS	M4014 ; SETA ACTIVADA O PUERTA ABIERTA
DEF	MS>PUERT	M4016 ; ALGUNA PUERTA ABIERTA
DEF	MS>MANDO	M4018 ; SE PUEDE PULSAR MANDO

;

DEF	MS>CHOQU	M4020 ; SALTO SEGUIDOR O PARADA CONTROLADA
DEF	MS>NOSEG	M4022 ; NO HAY SEGUIDOR
DEF	MS>DISAB	M4030 ; RAYO Y GAS DESHABILITADOS
DEF	MS>CNCFH	M4032 ; CNC PARADO, NO RAYO
DEF	MS>ENRAY	M4034 ; NO PERMISO BOTONERA, NO RAYO

;

DEF	MS>REGUX	M4040 ; REGU X NO LISTO
DEF	MS>REGUY	M4041 ;
DEF	MS>REGUZ	M4042 ;
DEF	MS>REGUW	M4043 ;

;

DEF	MS>HVOFF	M4060 ; CAIDA HV LASER
-----	----------	------------------------

;

; RELOJ PARA PARPADEO

DEF	RELOJ04	M2011 ; 0.4 SEG
-----	---------	-----------------

;

; TECLAS CNC

DEF	RESET	\$FFF3
-----	-------	--------



```

;
; PARAMETROS MAQUINA DEL PLC CON VALORES DE CONTROL DEL SEGUIDOR
;DEF      USER16      USER16
;
; VALORES DE CONTROL DEL SEGUIDOR
DEF      VELSEG        9000 ; VELOCIDAD DE BAJADA SEGUIDOR
DEF      VELSEGN       -15000 ; VELOCIDAD DE SUBIDA SEGUIDOR
DEF      RINSEG        22000 ; MINIMO PARA EMPEZAR SEGUIMINETO
DEF      ROUTSEG       -30000 ; MAXIMO ZONA ERROR
DEF      RVIAC         8000 ; MAX /ACTUAL-ANTERIOR/
DEF      ZONAMAS       1000 ; ZONA PARA FIN DE M
DEF      ZONAMENOS     -1000
DEF      ROFFPENK      -7000 ; K OFFSET PARA PENETRACION
DEF      POTOFFSET     10000 ;OFFSET POTENCIOMETRO
;
; REGISTROS PARA TRABAJO CON VALORES DE CONTROL DEL SEGUIDOR
DEF      ROFFPEN       R1 ; R OFFSET PARA PENETRACION
DEF      RANASEG       R2 ; LECTURA ANALOGICA SEGUIDOR
DEF      RANAOLD       R3 ; LECTURA ANA. SEGUIDOR, ANTERIOR
DEF      RANADIF       R4 ; VARIACION ENTRE LECTURAS
DEF      RANAPOT       R5 ; LECTURA ANALOGICA POTENCIOMETRO
DEF      RANAOUT       R6 ; VALOR DE CONSIGNA EJE Z COMO SEG.
DEF      RPOSZ         R7 ; POSICION Z AL EMPEZAR BAJADA SEG.
DEF      RVEL          R8 ; VELOCIDAD CNC
DEF      RPDTE         R9 ; PENDIENTE POWER-VELOCIDAD
DEF      RPOWER        R10 ; CONSIGNA POTENCIA
DEF      RINI          R11 ; VALOR INICIAL EN M>POWER1
DEF      RBASURA      R256 ; BASURA
;
;
; SIGNIFICADO DE LOS PARAMETROS GLOBALES
; P100:   VELOCIDAD DE TRABAJO
; P102:   TIEMPO DE PENETRACION
; P103:   POTENCIA MINIMA CON CONSIGNA CNC
; P104:   POTENCIA MAXIMA CON CONSIGNA CNC
; P105:   VELOCIDAD-POTENCIA MAXIMA
;
;*****
; 1ER CICLO
;*****
; BORRA TODAS LAS MARCAS, SALIDAS Y REGISTROS
; INICIALIZA      MARCA      M>INIT
;
CY1
;

```

### C. Programa PLC modificado

236

```

()
= ERA      M1 1200                ; BORRA MARCAS
= ERA      M4000 4127             ; MENSAJES
= ERA      M4500 4563             ; ERRORES
= ERA      O2 24                  ; SALIDAS
= ERA      R1 256                 ; REGISTROS
= ERA      MBCD1 MBCD7            ; EMES
= SET      M>INIT                 ; MARCA INICIAL
= RES      /STOP                  ; BLOQUEA CNC
= RES      /FEEDHOL               ; //
= RES      /XFERINH               ; //
= MOV 0    RBASURA 0032
= CNCWR(RBASURA, ANAO5, M1)      ; CONSIGNA PLC = 0, PARA EJE Z
= RES      DRO3                  ; EJE Z CONTROLADO POR CNC
END
;*****
PE 32      ; MODULO PERIODICO PARA SEGUIDOR
;
()
= MOV RANASEG RANAOLD 0032
= CNCRD(ANAI1, RANASEG, M1)
;= MOV R250 RANASEG 0032
= SBS RANASEG RANAOLD RANADIF
CPS RANADIF LT 0
= NGS RANADIF
;
M>SEG2 OR M>SEG3 ; CALCULA CONSIGNA
= CNCRD(ANAI2, RANAPOT, M1)
= DVS RANAPOT 2 RANAPOT
= ADS RANAPOT POTOFFSET RANAPOT
= ADS RANAPOT RANASEG RANAOUT
= ADS ROFFPEN RANAOUT RANAOUT
;
(M>SEG2 OR M>SEG3) ; LIMITA+
AND CPS RANAOUT GT VELSEG
= MOV VELSEG RANAOUT 0032
;
(M>SEG2 OR M>SEG3) ; LIMITA-
AND CPS RANAOUT LT VELSEGN
= MOV VELSEGN RANAOUT 0032
;
(M>SEG2 OR M>SEG3) ; SACA CONSIGNA
= CNCWR(RANAOUT, ANAO5, M1)
;
DFU MSTROBE AND CPS MBCD* EQ DES>RAYO ; APAGADO MAS RAPIDO

```

### C. Programa PLC modificado

237

```
= RES ON>RAYO
= RES M>RAYO1
= SET M>RAYO
;
END
;*****
PRG ;INICIO PROGRAMA PRINCIPAL
;
;*****
; COPIA ENTRADAS A MARCAS
;*****
( )
= MOV I1 M1801 0032
= MOV I33 M1833 008
;
;PARA PUESTA A PUNTO
( )
= M1
;= SET    EMERIN      ;M1801
;= RES    MICROX      ;M1802
;= RES    MICROY      ;M1803
;= RES    MICROZ      ;M1804
;= RES    MICROW      ;M1805
;= SET    LISTOX      ;M1806
;= SET    LISTOY      ;M1807
;= SET    LISTOZ      ;M1808
;= SET    LISTOW      ;M1809
;= RES    GAS1        ;M1810 ; PUPITRE
;= RES                      ;M1811 ; //
;= SET    GAS2        ;M1812 ; //
;= RES    MARCHA      ;M1813 ; //
;= RES    PARADA      ;M1814 ; //
;= RES    SEG>UP      ;M1815 ; //
;= RES    SEG>DW      ;M1816 ; //
;= SET    ENA>RAYO    ;M1817 ; //
;= SET    V24ENT      ;M1818
;= SET    V24SAL      ;M1819
;= SET    TERMICOS    ;M1820
;= SET    CURSOS      ;M1821
;= SET    SETAS       ;M1822
;= SET    AIRECP      ;M1823
;= SET    PUERTAS     ;M1824
;= SET    MANDO>ON    ;M1825
;= SET    FUENTE      ;M1826
;
```

## C. Programa PLC modificado

238

```

;= SET    HV>ON           ;M1833
;= RES    SHUT>CL        ;M1834
;= RES    SHUT>OP        ;M1835
;
;*****
; EMERGENCIA
;*****
EMERIN =    /EMERGEN      ; entrada EMERGENCIA
;
M>EMER
=    RES M>EMER
=    TG1 3 100
;
/EMERGEN AND /ALARM AND NOT T3 = EMEROUT ; salida
;
;*****
; INICIALIZACION SI MANDO>ON
;*****
; NOTA: EL 'RUN' DEL PLC Y "CNC" ES LA SALIDA
; EMERGENCIA (O1).
;
M>INIT
AND MANDO>ON
=    RES    M>INIT      ; EVOLUCION
=    SET    M101        ;
=    SET    M>RAYO      ; INIT RED
=    SET    M>GAS       ;
=    SET    M>M1        ;
=    SET    M>SEG       ;
=    SET    /STOP       ; DESBLOQUEA CNC
=    SET    /FEEDHOL    ;
=    SET    /XFERINH    ;
;=    SET    OFF>HV      ; PERMISO HV LASER
=    ERA    M4000 4127   ; BORRA MENSAJES
=    ERA    M4500 4563   ; ERRORES
=    RES    ANOMALIA
;
M101
AND NOT MANDO>ON
=    ERA    M1 1200      ; BORRA MARCAS
=    ERA    O1 24        ; SALIDAS
=    ERA    R1 256       ; REGISTROS
=    ERA    MBCD1 MBCD7  ; EMES
=    SET    M>INIT      ; MARCA INICIAL
=    RES    /STOP       ; BLOQUEA CNC

```



```

= RES    /FEEDHOL          ; //
= RES    /XFERINH          ; //
= MOV 0   RBASURA 0032
= CNCWR(RBASURA,ANAO5,M1) ; CONSIGNA PLC = 0, PARA EJE Z
= RES     DRO3              ; EJE Z CONTROLADO POR CNC
= SET     ANOMALIA
= JMP     L256
;
;*****
; CIERRA DEL OBTURADOR AL INI/FINAL PROGRAMA
;*****
DFU MSTROBE AND ( CPS MBCD* EQ $100 OR CPS MBCD* EQ
$30 )= SET OFF>HV
DFD MSTROBE AND ( CPS MBCD* EQ $100 OR CPS MBCD* EQ
$30 )= RES OFF>HV
;*****
; ANALISIS CADENA DE MANDO
;*****
NOT      MANDO>ON
AND      NOT V24SAL
=        MS>V24S
;
NOT      MANDO>ON
AND      NOT FUENTE
AND      V24SAL
=        MS>ALIM
;
NOT      MANDO>ON
AND      NOT TERMICOS
AND      FUENTE
=        MS>TERM
;
NOT MANDO>ON
AND      NOT CURSOS
AND      TERMICOS
=        MS>CURSOS
;
NOT MANDO>ON
AND      NOT SETAS
AND      CURSOS
=        MS>SETAS
;
NOT MANDO>ON
AND      NOT PUERTAS
AND      SETAS

```

### C. Programa PLC modificado

240

```
=          MS>PUERT
;
NOT MANDO>ON
AND      PUERTAS
=          MS>MANDO
;*****
; ANOMALIA:      FALTA PRESION (AIRE O GAS)
;
; SOLO SE INDICA LA FALTA DE PRESION
; PUEDE QUE SEA NECESARIO PARAR EL PROGRAMA
;*****
ON>RAYO    AND NOT      AIRECP AND M2012
= ANOMALIA
;
ON>RAYO    AND NOT      AIRECP
= MS>AIRE
;
;*****
; VIGILA V24ENT
;*****
NOT V24ENT = MS>V24E
;*****
; HABILITA REGULADORES
;*****
;
MANDO>ON AND LISTOX AND LISTOY AND NOT LOPEN
=      REGUXY
=      SERVO1ON
=      SERVO2ON
MANDO>ON AND LISTOZ AND NOT LOPEN
=      REGUZ
REGUZ AND NOT DRO3
=      SERVO3ON
LISTOX
=      NOT MS>REGUX
LISTOY
=      NOT MS>REGUY
LISTOZ
=      NOT MS>REGUZ
;
; TRATAMIENTO EJE DIVISOR
;
MANDO>ON AND DFU MSTROBE AND CPS MB CD* EQ DIVISOR
=      SET MDIVISOR
MDIVISOR AND NOT LISTOW
```

```

= MS>REGUW
MDIVISOR AND LISTOW
= REGUW
= SERVO4ON
;
;*****
; ACCIONES CON TECLA RESET DEL CNC
;*****
; RESET FUENTE DE REGULACION
;
NOT MANDO>ON
= CNCRD(KEY,RBASURA,M1)
NOT MANDO>ON AND CPS RBASURA EQ RESET
= TG1 4 100
T4
= RESETREG
;
;*****
; MICROS IO
;*****
MICROX = DECEL1
MICROY = DECEL2
MICROZ = DECEL3
MICROW = DECEL4
;
;*****
; TRATAMIENTO GASES
;*****
;
( M>GAS ; PASO A ESTADO DE PETICION GAS1
OR M>GAS2)
AND DFU MSTROBE
AND CPS MB CD* EQ ACT>GAS1
= RES M>GAS
= RES M>GAS2
= SET M>GAS1
( M>GAS ; PASO A ESTADO DE PETICION GAS2
OR M>GAS1)
AND DFU MSTROBE
AND CPS MB CD* EQ ACT>GAS2
= RES M>GAS
= RES M>GAS1
= SET M>GAS2
( M>GAS1 ; PASO A ESTADO SIN PETICION DE GAS OR M>GAS2)
AND (DFU MSTROBE

```

### C. Programa PLC modificado

242

```
AND CPS MBCD* EQ DES>GAS )
= RES M>GAS1
= RES M>GAS2
= SET M>GAS
;
; SALIDAS DANDO PRIORIDAD A LA BOTONERA
NOT GAS1
AND NOT GAS2
= M>GASCNC ; PERMISO A SELECCION CNC
( GAS1 OR ( M>GAS1 AND M>GASCNC AND NOT M>DISABL ))
= ON>GAS1 ; SALIDA GAS1. VER T5 EN TRAT. RAYO
( GAS2 OR ( M>GAS2 AND M>GASCNC AND NOT M>DISABL ))
= ON>GAS2 ; SALIDA GAS2
;
;*****
; TRATAMIENTO SEGUIDOR
;*****
M>SEG AND REGUZ ; PARA EMPEZAR SEGUIMIENTO
AND ( ( DFU MSTROBE
AND CPS MBCD* EQ ACT>SEG) OR SEG>DW )
AND ( CPS RANASEG GT RINSEG )
= RES M>SEG
= SET M>SEG4
= MOV 0 ROFFPEN 0032
;
M>SEG AND REGUZ ; PARA EMPEZAR SEGUIMIENTO CON OFFSET PEN-
ETRACION
AND DFU MSTROBE
AND ( CPS MBCD* EQ ACT>SEGP )
AND ( CPS RANASEG GT RINSEG )
= RES M>SEG
= SET M>SEG4
= MOV ROFFPENK ROFFPEN 0032
;
M>SEG3 AND
DFU MSTROBE ; TRAS FIN PENETRACION
AND CPS MBCD* EQ ACT>SEG
= MOV 0 ROFFPEN 0032
;
M>SEG3 AND
DFU MSTROBE ; OTRA PENETRACION
AND CPS MBCD* EQ ACT>SEGP
= MOV ROFFPENK ROFFPEN 0032
;
M>SEG4
```



```

= RES M>SEG4
= SET M>SEG1
;= SET M>DISABL
= RES MS>CHOQU
= RES MS>NOSEG
= RES /XFERINH
;= RES /FEEDHOL
;= SET M>STOP
= SET DRO3
;
M>SEG ; NO SE PUEDE EMPEZAR SEGUIMIENTO
AND ( ( DFU MSTROBE
AND ( CPS MBCD* EQ ACT>SEG OR CPS MBCD* EQ ACT>SEGP ) ) OR SEG>DW )
AND ( CPS RANASEG LT RINSEG )
= SET MS>NOSEG
= SET M>STOP
;
M>SEG AND DFU INCYCLE
= RES MS>NOSEG
;
M>SEG1 ; CAMBIO A VELOCIDAD DE FRENADA
AND ( CPS RANASEG LE RINSEG )
= RES M>SEG1
= SET M>SEG2
;
M>SEG2 ; EN ZONA
AND ( CPS RANAOUT LE ZONAMAS )
AND ( CPS RANAOUT GT ZONAMENOS )
= RES M>SEG2
= SET M>SEG3
; EN ZONA, FIN DE LA M
;= SET M>START
= SET /XFERINH
;= SET /FEEDHOL
= RES M>DISABL
;
(M>SEG1 OR M>SEG2 OR M>SEG3)
AND (
SEG>UP OR ; SUBIR SEGUIDOR
DFD PARADA OR ; PARADA PULSADOR
DFD INCYCLE OR ; PARADA PGR
DFD MANUAL OR ; FIN MODO MANUAL
DFD AUTOMAT OR ; FIN MODO AUTOMATICO
CPS RANADIF GE RVARIAC OR ; VARIACION BRUSCA
CPS RANASEG LT ROUTSEG ) ; PALPADOR SIN SEGUIDOR

```

### C. Programa PLC modificado

244

```
= RES M>SEG1
= RES M>SEG2
= RES M>SEG3
= SET M>SEG5
= SET MS>CHOQU
= SET M>STOP
= MOV 0 RBASURA 0032
= CNCWR(RBASURA,ANAO5,M1)
;
(M>SEG1 OR M>SEG2 OR M>SEG3)
AND DFU MSTROBE
AND CPS MBCD* EQ DES>SEG
= RES M>SEG1
= RES M>SEG2
= RES M>SEG3
= SET M>SEG5
;= RES /XFERINH
;= RES /FEEDHOL
;
M>SEG5
= RES M>SEG5
= SET M>SEG6
= SET M>DISABL
= CNCRD(POSZ,RPOSZ,M1)
= ADS RPOSZ 250000 RPOSZ
;
M>SEG6
= CNCRD(POSZ,RBASURA,M1)
;
M>SEG6
AND CPS RBASURA GT RPOSZ
= RES M>SEG6
= SET M>SEG
= MOV 0 RBASURA 0032
= CNCWR(RBASURA,ANAO5,M1)
= RES DRO3
= SET /XFERINH
;= SET /FEEDHOL
= RES M>DISABL
= RES MS>CHOQU
;
M>SEG1 AND NOT SERVO3ON ; BAJANDO
= MOV VELSEG RBASURA 0032
= CNCWR(RBASURA,ANAO5,M1)
;
```

## C. Programa PLC modificado

245

```

DFU M>SEG6 ; SUBIENDO
= MOV VELSEGN RBASURA 0032
= CNCWR(RBASURA, ANAO5, M1)
;
; *****
; DISABLE RAYO Y GAS (al final del scan)
; *****
; OBJETO: CORTAR RAYO Y GAS, SIN PERDER EL ESTADO PREVIO
; DISABLE CON DYS>RYG, ENABLE CON ACT>RAYO, ACT>GAS1, ACT>GAS2, EN>RYG

DFU MSTROBE
AND CPS MBCD* EQ DIS>RYG
;OR M>SEG6 ; SEGUIDOR SUBIENDO
= SET M>DISABL
;
M>DISABL
AND DFU MSTROBE
AND (
CPS MBCD* EQ EN>RYG
;OR CPS MBCD* EQ ACT>RAYO
;OR CPS MBCD* EQ ACT>GAS1
;OR CPS MBCD* EQ ACT>GAS2
)
= RES M>DISABL
;
M>DISABL
= MS>DISAB
;
; *****
; GAS3
; *****
DFU MSTROBE AND CPS MBCD* EQ ACT>GAS3
= SET GAS3
DFU MSTROBE AND CPS MBCD* EQ DES>GAS3
= RES GAS3
;
; *****
; TRATAMIENTO RAYO (al final del scan)
; *****
; EN FHOUT CNC INDICA QUE PGR EN STOP
M>RAYO
AND DFU MSTROBE
AND CPS MBCD* EQ ACT>RAYO
= RES M>RAYO
= SET M>RAYO1

```

```

;
M>RAYO1          ; ESTADO = PETICION RAYO
AND (DFU MSTROBE
AND CPS MBCD* EQ DES>RAYO OR DFD AUTOMAT)
=   RES    M>RAYO1
=   SET    M>RAYO
;
;M>RAYO1          ; PETICION
;AND DFD INCYCLE ; RETARDO EN PARADA
;=   TG1 2 1000    ; 1000ms MAS DE RAYO
;=   TG1 5 2000    ; 2000ms MAS DE GAS
;
; SALIDA RAYO
M>RAYO1          ; PETICION
;AND NOT FHOUT    ; CNC NO PARADO
;AND (INCYCLE OR T2) ; RETARDO EN PARADA
AND INCYCLE
AND NOT M>DISABL   ; RAYO Y GAS NO DISABLE
AND ENA>RAYO       ; PERMISO BOTONERA
=   M>RAYOACTIVO   ; CONDICION PARA QUE HAYA RAYO
DFU M>RAYOACTIVO
=   SET OP>SHUT
;
OP>SHUT
=   TG1 10 500
T10 =   RES OP>SHUT
;
M>RAYOACTIVO AND SHUT>OP AND NOT SHUT>CL
=   ON>RAYO
;
; LAMPARA INDICA RAYO
ON>RAYO
OR ( M>RAYO1 AND RELOJ04)
=   RAYOSIGN
;
; MENSAJE SI RAYO Y (CNC PARADO O NO PERMISO BOTONERA)
(FHOUT OR NOT INCYCLE)
AND M>RAYO1
=   MS>CNCFH
NOT   ENA>RAYO
AND   M>RAYO1
=   MS>ENRAY
;
; *****
; DETECCION CAIDA HV

```



```

;*****
DFD HV>ON
=   SET   M>STOP
=   SET   MS>HVOFF
;=   SET   OFF>HV      ; TRAS CAIDA POR MANDO OFF,
PERMISO
DFU   HV>ON
=   RES   MS>HVOFF
;
;*****
; PERMITE PUERTA ABIERTA
;*****
;DFU MSTORE AND CPS MBCD* EQ EN>PORT
;=   SET   BARRERA
;
;*****
; CANALES
;*****
DFU MSTORE AND ( CPS MBCD* EQ $100 OR CPS MBCD* EQ $30 )
=   RES PULSE1 = RES PULSE2 = RES PULSE4 = RES PULSE8 = RES M>PWREXTCONT
DFU MSTORE AND CPS MBCD* EQ $101
=   SET PULSE1 = RES PULSE2 = RES PULSE4 = RES PULSE8
DFU MSTORE AND CPS MBCD* EQ $102
=   RES PULSE1 = SET PULSE2 = RES PULSE4 = RES PULSE8
DFU MSTORE AND CPS MBCD* EQ $103
=   SET PULSE1 = SET PULSE2 = RES PULSE4 = RES PULSE8
DFU MSTORE AND CPS MBCD* EQ $104
=   RES PULSE1 = RES PULSE2 = SET PULSE4 = RES PULSE8
DFU MSTORE AND CPS MBCD* EQ $105
=   SET PULSE1 = RES PULSE2 = SET PULSE4 = RES PULSE8
DFU MSTORE AND CPS MBCD* EQ $106
=   RES PULSE1 = SET PULSE2 = SET PULSE4 = RES PULSE8
DFU MSTORE AND CPS MBCD* EQ $107
=   SET PULSE1 = SET PULSE2 = SET PULSE4 = RES PULSE8
DFU MSTORE AND CPS MBCD* EQ $108
=   RES PULSE1 = RES PULSE2 = RES PULSE4 = SET PULSE8
DFU MSTORE AND CPS MBCD* EQ $109
=   SET PULSE1 = RES PULSE2 = RES PULSE4 = SET PULSE8
DFU MSTORE AND CPS MBCD* EQ $110
=   RES PULSE1 = SET PULSE2 = RES PULSE4 = SET PULSE8
DFU MSTORE AND CPS MBCD* EQ $111
=   SET PULSE1 = SET PULSE2 = RES PULSE4 = SET PULSE8
DFU MSTORE AND CPS MBCD* EQ $112
=   RES PULSE1 = RES PULSE2 = SET PULSE4 = SET PULSE8
DFU MSTORE AND CPS MBCD* EQ $113

```

### C. Programa PLC modificado

248

```

=      SET PULSE1 = RES PULSE2 = SET PULSE4 = SET PULSE8
DFU MSTROBE AND CPS MBCD* EQ $114
=      RES PULSE1 = SET PULSE2 = SET PULSE4 = SET PULSE8
DFU MSTROBE AND CPS MBCD* EQ $115
=      SET PULSE1 = SET PULSE2 = SET PULSE4 = SET PULSE8
;
;*****
; NIVELES
;*****
DFU MSTROBE AND ( CPS MBCD* EQ $120 OR CPS MBCD* EQ $30 )
      =RES LEVEL1 =RES LEVEL2 =RES LEVEL4 =RES M>POWER =RES EXTPOWER
      =ERA M901 905 ; M>POWER1-5
DFU MSTROBE AND CPS MBCD* EQ $121
      =SET LEVEL1 =RES LEVEL2 =RES LEVEL4 =RES M>POWER =RES EXTPOWER
DFU MSTROBE AND CPS MBCD* EQ $122
      =RES LEVEL1 =SET LEVEL2 =RES LEVEL4 =RES M>POWER =RES EXTPOWER
DFU MSTROBE AND CPS MBCD* EQ $123
      =SET LEVEL1 =SET LEVEL2 =RES LEVEL4 =RES M>POWER =RES EXTPOWER
DFU MSTROBE AND CPS MBCD* EQ $124
      =RES LEVEL1 =RES LEVEL2 =SET LEVEL4 =RES M>POWER =RES EXTPOWER
DFU MSTROBE AND CPS MBCD* EQ $125
      SET LEVEL1 =RES LEVEL2 =SET LEVEL4 =RES M>POWER =RES EXTPOWER
DFU MSTROBE AND CPS MBCD* EQ $126
      =RES LEVEL1 =SET LEVEL2 =SET LEVEL4 =RES M>POWER =RES EXTPOWER
DFU MSTROBE AND CPS MBCD* EQ $127
      =SET LEVEL1 =SET LEVEL2 =SET LEVEL4 =RES M>POWER =RES EXTPOWER
DFU MSTROBE AND CPS MBCD* EQ $128
      =RES LEVEL1 =RES LEVEL2 =RES LEVEL4 =SET M>POWER =SET EXTPOWER
      =ERA M901 906 ; M>POWER1-6=0
DFU MSTROBE AND CPS MBCD* EQ $129
      =RES LEVEL1 =RES LEVEL2 =RES LEVEL4 =RES M>POWER =SET EXTPOWER
      =SET M>POWER1 =ERA M902 906 ; M>POWER2-6=0
DFU MSTROBE AND CPS MBCD* EQ $130
      =RES LEVEL1 =RES LEVEL2 =RES LEVEL4 =RES M>POWER
=RES M>POWER1
      =SET M>PWREXTCONT =SET EXTPOWER =ERA M901
905 ; M>POWER0-5=0
;*****
; CONSIGNA DE POTENCIA
;*****
DFU M>POWER
=      MOV 0 RBASURA 0032
=      CNCWR(RBASURA, ANAO6, M1)
=      CNCRD(GUP 103, R103, M1)
=      CNCRD(GUP 104, R104, M1)

```

---

```

=   CNCRD(GUP 105,R105,M1)
=   MLS R103 1000 R103
=   MLS R104 1000 R104
=   SBS R104 R103 RPDTE
=   DVS RPDTE R105 RPDTE      ; RPDTE=(R104-R103)/R105
;
M>POWER
=   CNCRD(FREAL,RVEL,M1)
=   DVS RVEL 10000 RVEL
;
M>POWER
AND CPS RVEL LT R105
=   MLS RVEL RPDTE R255
=   ADS R255 R103 RPOWER
=   CNCWR(RPOWER,ANAO6,M1)
M>POWER
AND CPS RVEL GE R105
=   CNCWR(R104,ANAO6,M1)
;
;*****
; CONSIGNA DE POTENCIA = f(U)
;*****
DFU M>POWER1
=   MOV 0 RBASURA 0032
=   CNCWR(RBASURA,ANAO6,M1)
=   CNCRD(GUP 103,R103,M1)      ; t con salida 0
=   CNCRD(GUP 104,R104,M1)      ; t subida pot
=   CNCRD(GUP 105,R105,M1)      ; t pot alta
=   CNCRD(GUP 106,R106,M1)      ; t bajada pot
=   CNCRD(GUP 107,R107,M1)      ; pot alta
=   CNCRD(POSU,RINI,M1)
=   DVS RINI 1000 RINI
=   MLS R107 1000 R107
=   DVS R107 R104 RPDTE
=   MOV 0 RVEL 0032
=   SET M>POWER2
;
M>POWER2 AND CPS RVEL GE R103
=   RES M>POWER2
=   SET M>POWER3
=   ADS RINI R103 RINI
=   MOV 0 RVEL 0032
;
M>POWER3 AND CPS RVEL GE R104
=   RES M>POWER3

```

## C. Programa PLC modificado

250

```

= SET M>POWER4
= ADS RINI R104 RINI
= MOV R107 RPOWER 0032
= CNCWR(RPOWER,ANAO6,M1)
= MOV 0 RVEL 0032
= JMP L255
;
M>POWER4 AND CPS RVEL GE R105
= RES M>POWER4
= SET M>POWER5
= ADS RINI R105 RINI
= DVS R107 R106 RPDTE
= MOV 0 RVEL 0032
;
M>POWER5 AND CPS RVEL GE R106
= RES M>POWER5
= RES M>POWER1
= MOV 0 RBASURA 0032
= CNCWR(RBASURA,ANAO6,M1)
= JMP L255
;
M>POWER1 ; LECTURA PERMANENTE DE COTA U
= CNCRD(POSU,RVEL,M1)
= DVS RVEL 1000 RVEL
= SBS RVEL RINI RVEL
;M>POWER1 AND CPS RVEL LT 0
;= ADS RVEL 3600 RVEL
;
M>POWER3 ; SUBIDA POT
= MLS RVEL RPDTE RPOWER
= MOV RPOWER R243 0032
= CNCWR(RPOWER,ANAO6,M1)
;
M>POWER5 ; BAJADA POT
= SBS R106 RVEL RBASURA
= MLS RBASURA RPDTE RPOWER
= MOV RPOWER R245 0032
= CNCWR(RPOWER,ANAO6,M1)
L255
;*****
;CONTROL EXTERNO DE POTENCIA (M130)
;*****
DFUM>PWREXTCONT
= MOV 0 RBASURA 0032
= CNCWR (RBASURA, ANAO6, M1)

```



---

```

M>PWREXTCONT
=   CNCRD (ANAI3, RPOWER, M1)
=   MLS   RPOWER 1 RPOWER
M>PWREXTCONT AND CPS RPOWER LT 0000099425
=   CNCWR (RPOWER, ANAO6, M1)
M>PWREXTCONT AND CPS RPOWER GT 0000099425
=   MOV   0000099425   POWER
=   CNCWR(RPOWER, ANAO6, M1)
DFDM>PWREXTCONT ; PONE ANAO6=0 AL FINALIZAR
=   MOV   0   RBASURA 0032
=   NCWR(RBASURA, ANAO6, M1)
;*****
; MARCHA Y PARADA
;*****
START OR MARCHA OR M>START
=   CYSTART
=   RES M>START
;
M>STOP OR NOT PARADA
=   RES M>STOP
=   NOT /STOP
;
;DESACTIVAR GAS
=   RES M>GAS1
=   RES M>GAS2
=   SET M>GAS
;DESACTIVAR RAYO
=   RES M>RAYO1
=   SET M>RAYO
;*****
; STROBE -> AUXEND
;*****
MSTROBE OR TSTROBE = TG1 1 50
NOT T1 = AUXEND
;
;*****
;tratamiento M1
;*****
L256
END

```





UNIVERSIDADE DA CORUÑA